

第 1 章 費用・便益分析と多基準分析

1 概要

21 世紀は環境の世紀と言われている。持続可能な開発（すなわち、将来見込まれる経済的・社会的便益の可能性を損なうことなく、現在享受できる経済的・社会的便益を最適化するよう経済発展の形態を維持する）のために経済と環境の調和をはかり、限られた資源、なかでも環境資源の適正な利用をはかることが要請されている。

適正な利用をどのように定義するかは難しいところであるが、1990 年代に入って資源配分の効率性の観点からさまざまな政策の投資効果を評価する動きがわが国においても出てきた。現在では、費用便益分析が公共政策決定手法のひとつとして位置づけられおり、環境資源もすでに多くの公共事業で評価の対象となっている。

公共投資政策を行うか否か、あるいは、行うとすればどのような形で行うかを定めることは、社会的な意思決定といえるだろう。（個人的なものであれ社会的なものであれ）意思決定は、選択できる選択肢（代替案）を確定し、その結果を予想し、その結果の評価によって最適な選択肢（代替案）を決定することである（繁杵，1995）。人々はさまざまな状況下でこのような意思決定を行っている。

個人的意思決定問題、さらには、この個人の選好をどのように社会的意思決定に反映させていくかは極めて大きな問題であり、意思決定論の研究領域として膨大な量の研究成果が公表されている（たとえば、佐伯，1980；佐伯，1986；市川，1996；Sen, 1970；Keeney and Raiffa, 1976, 1993；Keeney, 1992 他）。

また、個人的および社会的意思決定が実際には、ひとつの視点からだけでなく、いくつかの視点から行われている、あるいは、行われるべきであることに注目して、多目的、多属性、多基準などの用語を用いての意思決定が検討されている（Keeney and Raiffa, 1970, 1993；ネイカンブ他，1989；Vincke, 1992；Yoon and Hwang, 1995；Clemen, 1996；Olson, 1996 など参照）。

さらに、社会的意思決定を行う場合に、代表となる意思決定者を想定し、その意思決定者が他のステイクホルダーの意思を取り込むことで社会的意思決定につなげるという考え方や、複数のステイクホルダー間にコンフリクトが存在する場合を明示的に

扱い、議論や交渉によって社会的な合意に達するように働くファシリテーターの存在を想定したもの、さらには、ゲーム理論の枠組みを用いての合意形成など、さまざまな提案が行われている（たとえば、岡田他；Keeney, 1992 など）。

費用便益分析を適用する際には便益（経済的価値）の測定は大きな問題として挙げられている。特に、環境の保全や創造による便益の測定は難しい問題であり、すでに、環境の経済的価値を評価する手法については膨大な研究や実証例が示されている。しかしながら、環境の評価そのものに関してもまだ十分信頼のもてるものとなっていない状況下で、そのことをどれだけ念頭において費用便益分析を行うかということである。

また、費用便益分析の可能性と限界（Hanley and Spash, 1993 など参照）をその理論的根拠などから十分に見極めた上で意思決定につなげる必要がある。さらに、その限界を考えたときに、費用便益分析以外の意思決定手法を検討することも必要であろう。本稿では、多基準分析手法について、複数の意思決定の主体（ステイクホルダー）をどのように取り込んでいるか、また、多様な複数目的（あるいは基準）、などをどのように扱っているかという観点から適用可能性を検討することとする。

2. では、費用便益分析について、まずその理論的基礎である経済学の基礎的概念から厚生経済学に基づいた厚生の測度を説明する。

3. では、多目的あるいは多基準を考慮に入れた分析手法である多基準分析を紹介する。多基準分析の範疇に入る手法はいくつかあるが、その中から、多目的最適化モデル、多属性効用理論、価値関数、線形加法モデル、AHP、アウトランキング手法（ELECTRE やコンコーダンス分析）の簡単な紹介と意思決定支援のための手法としての可能性について述べることとする。

2 費用便益分析

2.1 費用便益分析の概観

費用便益分析（CBA）とは、ある政策が社会にもたらす純社会便益（Net Social Benefit：NSB）を測ることであると定義される。純社会便益とは、政策によって発生する社会的便益（Social Benefit：B）と社会的費用（Social Cost：C）との差であり、その政策の価値を表す。

$$\text{純社会便益：} NSB = B - C$$

費用便益分析の目的は、政策の実施についての社会的な意思決定を支援し、社会に

賦存する資源の効率的な配分を促進することである。費用便益分析は、経済学の分野で消費者余剰の概念が確立された頃から実際の政策に適用され始め、現在に至るまで政策の効率性評価の中心的役割を担っている。

アメリカでは、1936年に the Flood Control Act において CBA の概念が初めて採り入れられ、1950年の the Federal Interagency River Basin Committee の報告書を契機として、水資源開発の標準的なガイドラインの中で適用が指示された。1960年代には、国防総省のシステム分析の一部として策定された PPBS (the Planning, Programming and Budgeting System) において体系的に導入された。個別事業ではなく、政策全般に対して CBA の適用を指示したのは1981年のレーガン政権の大統領令 12291 であり、主要な規制に対して規制インパクト分析 (Regulatory Impact Analysis : RIA) を求めた。1994年のクリントン政権の大統領令 12866 では、規制の費用と便益を評価することが明示的に指示されている。議会においては、1995年に採択された the Unfunded Mandates Reform Act が、1億ドル以上の費用をもたらす規制に対して CBA を行うことを定めた。さらに、FY 2000 Treasury and General Government Appropriations Act では、行政管理予算局 (the Office of Management and Budget : OMB) が規制の費用と便益に関する情報およびそれを測るためのガイドラインを出すことが定められ、連邦政府の政策形成の評価ツールとして不可欠な手法となっている。

一方、日本では、政策の投資効果を資源配分の効率性の観点から評価する動きが表立って出てきたのは、1990年代に入ってからである。戦後復興期から高度経済成長期にかけては、あらゆる社会基盤が充足していなかったため、投資効果を比較検討することなく積極的な公共投資が行われてきた。1990年代に入りバブル経済が崩壊し、経済・財政状況が厳しくなる中で、公共投資の無駄遣い、固定的な分野別配分、環境問題への関心の高まりなどから、国民の公共投資に対する批判が高まってきた。社会基盤整備への公共投資の効率性と有効性が強く意識されるようになったのである。このような流れの中で、1997年、行政改革会議最終報告において政策に関する評価機能の充実の必要性が提言され、橋本内閣総理大臣（当時）から、建設・運輸等公共事業関係省庁に対し、既存事業の再評価、事業採択段階における費用対効果分析（費用便益分析）の活用が指示される。1999年には、公共事業関係省庁（旧建設省、旧運輸省、農林水産省）がそれぞれ策定した事業評価実施要領において費用対効果分析が新規事業採択評価の一部として位置づけられることとなり、事業分野ごとに具体的なやり方を示したマニュアルが策定された。2001年には、中央省庁等改革の一環として政策評価制度が導入された。その中で、費用便益分析は、総務省が策定した「政策

評価に関する標準的ガイドライン」の3つの評価方式（事業評価、実績評価、総合評価）のうち、事業評価の手法のひとつとして位置づけられている。

2.2 費用便益分析の厚生経済学的基础

2.2.1 消費者の厚生

政策を評価する手法として、費用便益分析の概念を初めて提唱したのは、フランスの土木エンジニアであったジュール・デュピュイ（Arsene Jules Juvenal Dupuit：1804-66）である。デュピュイは、当時、古典派経済学者によって事業の経済性の無視を批判されていた政府の土木公団のエンジニア・エコノミストであったことから、公共事業の効用を厳密に確定することを最大の課題としていた。その成果が Dupuit, J. (1844) であり、橋の建設を事例として、限界効用概念に基づき、のちに消費者余剰と名付けられる考え方を示し、それと費用とを組み合わせることで公共事業の社会的厚生を数値的に表現しようとした（栗田，2001）。

デュピュイの余剰は、消費者がある財を買う際に実際に支払った金額と、支払おうと思っていた金額との差で表される。図1は、価格と消費量の関係を表した「消費曲線」を表す（消費曲線は、経済学における需要曲線とは異なり、数量が縦軸に、価格が横軸にとられている）。np 量に関する効用は、実際に支払う Op を最低限としてそれよりも大きい。よって、np 量に対する消費者の「絶対的効用」は台形 OrnP で表される。np 量に対する支払いをしたあとに、消費者に残された効用である「相対的効用」は、そこから生産費 Ornp を引くことで求められ、三角形 pnP となる。この「相対的効用」はまさに、のちに消費者余剰の概念を示している。

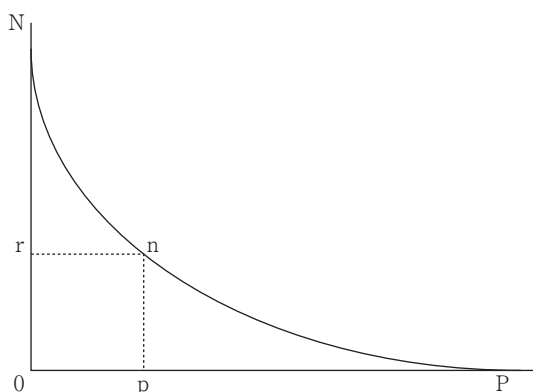


図1 デュピュイの消費曲線と余剰（栗田（2001）より作成）

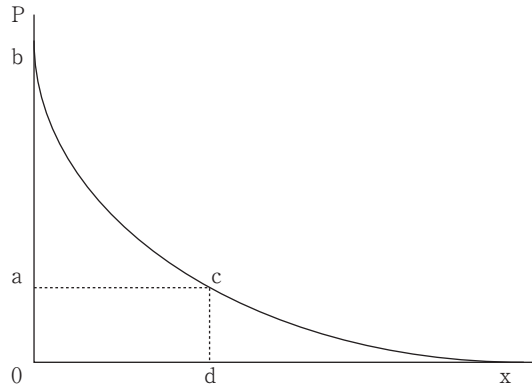


図2 マーシャルの需要曲線と消費者余剰

(1) 消費者余剰

デュピュイの「相対的効用」による余剰の概念を英語圏に紹介し、新古典派経済学の理論体系の中に位置づけたのが Marshall, A. (1920) である。

図2は、消費者の効用最大化行動から導かれるマーシャルの需要曲線を表している。消費者は、所与の所得と価格体系のもとで、自らの選好に基づいて効用を最大にするように財を選択すると仮定される。選好が選択に反映されるための条件として、完全性、推移性、反映性が仮定される。さらに、選好に基づく選択を効用関数として表現するために、連続性の仮定がおかれる。効用最大化問題は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{Max} \quad & U = U(x) \\ \text{s.t.} \quad & \\ & \sum p_i x_i = I \end{aligned} \quad (1)$$

x は x_i 財の数量を表すベクトル $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ を、 I は所得を表す。これを解くと、 x_i 財の需要を価格と所得で説明するマーシャルの需要関数が得られる。

$$x_i = x_i(\mathbf{p}, I) \quad \mathbf{p} = (p_1, \dots, p_i, \dots, p_n) \quad (2)$$

図2は x_i 財に関する需要関数を、価格と数量の平面に表したものである。デュピュイの余剰の概念を適用すれば、消費者余剰、すなわち、財の od 量を購入する消費者の純便益、は三角形 abc で表される。しかし、効用最大化行動に基づく需要曲線で消費者余剰を定義する場合、消費者余剰が即ち真の効用の貨幣測度となるとは限らない。それは、ある状態が変化して効用が変化したときの消費者余剰の変化は、状態の変化の順序に依存する性質（経路依存性）を持つことによる。すなわち、状態の変

化によって複数の財の価格が変化したり、価格と所得が同時に変化したりする場合、変化の順序によって消費者余剰の値は異なってくるためである。

消費者余剰の値が一意に定まるためには、経路独立性の条件を満たすことが必要とされる。複数の財の価格が変化する場合には、価格が変化した財の需要に対する所得弾力性が等しければ、経路独立性が満たされる。また、財の価格と所得が同時に変化する場合には、所得弾力性がゼロである場合に経路独立性が満たされる。前者の条件は、所得が変化した場合、価格が変化した財の消費量はすべて同じ割合で変化しなければならないことを示す。後者の条件は、所得が変化しても財の消費量は全く変化しないことを示す。このような消費行動をもたらず選好は、現実的ではない場合が多い。

さらに、消費者余剰の値が一意に定まる場合でも、消費者余剰が真に効用を表す測度であるためには、貨幣に対する限界効用 (Marginal Utility of Money: MUM) が価格や所得の変化に対して一定であるという条件が満たされなければならない。状態によって貨幣に対する限界効用が異なれば、もはや貨幣という共通の測度によって状態間の比較をすることができないからである。MUM が一定であるという条件もまた、実証的には満たされることが難しい。

マーシャルが明らかにした経路独立性および貨幣の限界効用一定の条件は、現実の消費行動ではほとんど満たされないと考えられたため、効用の貨幣測度として消費者余剰を用いることの妥当性に疑問が投げかけられた。

(2) 補償変分と等価変分

続いて消費者余剰の測度に関する理論を展開したのが、Hicks, J. R. である。2 財 (x_1, x_2) のうち、 x_1 財の価格 p^0 が p^1 に低下したときの消費者の効用最大化問題を考える。ここで、 x_2 財が x_1 財以外の財を表す価格 1 ($p_2 = 1$) の複合財であると仮定すると、 x_2 財はニューメレールであり、その数量は貨幣単位で表される。すなわち、予算制約線の x_2 財の切片は所得 I を表す。

$$\begin{aligned} \max \quad & U = U(x_1, x_2) \\ \text{s.t.} \quad & \\ & p_1 x_1 + x_2 = I \end{aligned} \quad (3)$$

図 3 に示されるように、 p^0 が p^1 に低下すると、消費可能な財の組み合わせは $x^0 = (x_1^0, x_2^0)$ から $x^1 = (x_1^1, x_2^1)$ となり、消費者の効用は U^0 から U^1 に増加する。ヒックスは、この効用の変化を補償変分および等価変分と呼ばれる所得の変化で表した。

補償変分 (Compensated Variation: CV) とは、価格が低下したとき、消費者を価

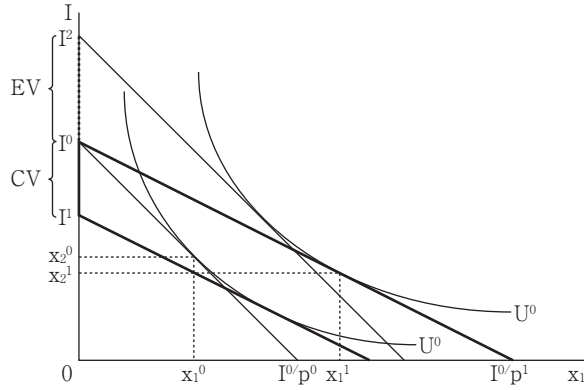


図3 補償変分と等価変分（価格が低下する場合）

格変化前の効用水準にとどめておくとしたら、その人から取り去らなければならない金額である。（価格が上昇した場合には、消費者を価格変化前の効用水準にとどめておくとしたら、その人に与えなければならない金額である。）図3によれば、補償変分は、価格低下後の予算制約線 $I^0 - I^0/p^1$ を、価格低下前の効用水準 U^0 を達成するように平行移動したときの所得変化 $I^0 I^1$ で表される。

等価変分（Equivalent Variation：EV）は、価格が低下したとき、価格低下がなかったとしても、消費者が価格低下後の効用水準を達成するとしたら、その人に与えなければならない金額である。（価格が上昇したときには、価格上昇がなかったとしても、消費者が価格上昇後の効用水準を達成するとしたら、その人から取り去らなければならない金額である。）図3では、価格低下前の予算制約線 $I^0 - I^0/p^0$ を、価格低下後の効用水準 U^1 を達成するように平行移動したときの所得変化 $I^0 I^2$ で表される。

同じ効用の変化を表す貨幣測度であるにもかかわらず、消費者余剰、補償変分および等価変分は一般に異なる値を示す。マーシャルの消費者余剰は、 $x_1 = x_1(p, I)$ について、 p_0 から p_1 までを積分したものであり、価格低下前の状態0と低下後の状態1では効用水準が異なっている。これに対し、補償変分および等価変分では、それぞれ価格低下前、価格低下後に効用水準が固定されている。効用水準が固定された場合の需要を表すのが、ヒックスの需要関数である。効用水準が変化しない場合、支出を最小にすることによって効用を最大にすることができる（双対性）。

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & E = \sum p_i x_i \\
 \text{s.t.} \quad & \\
 & U(x) = \bar{U}
 \end{aligned} \tag{4}$$

これを解くと、財の需要を価格と効用で説明するヒックスの需要関数 $x_i^H = x_i^H(p, U)$ が得られる。

図 4 は、価格低下による効用の変化を示す 3 つの余剰の関係を、需要曲線によって図示したものである。 p^0 から p^1 への価格低下に対し、 U^0 から U^1 への効用変化を伴う a 点 (x^0, p^0) と c 点 (x^1, p^1) を結ぶのがマーシャルの需要曲線 D である。一方、効用水準を U^0 に保ったままの a 点 (x^0, p^0) と d 点 (x^2, p^1) 、もしくは U^1 に保ったままの b 点 (x^3, p^0) と c 点 (x^1, p^1) を結ぶのがヒックスの補償需要曲線 $H(U^0)$ および $H(U^1)$ である。補償需要曲線上の変化は、効用の変化に対して所得が補償されるため、価格変化による需要の変化分（価格効果）のみを表している。よって、 X が正常財である場合、所得効果は正なので、マーシャルの需要曲線の方が価格に対して弾力的であり、3 つの需要曲線の間には図 4 のような関係が成立する。

補償変分は $x = x(p, U^0)$ について、等価変分は $x = x(p, U^1)$ について、それぞれ p^0 から p^1 までを積分したものである。図 4 では、 $p^0 adp^1$ が補償変分を、 $p^0 acp^1$ が消費者余剰を、 $p^0 bcp^1$ が等価変分を表す。

補償変分による貨幣測度は価格効果のみを測ることができるため、マーシャルの消費者余剰の場合に問題となった所得効果による経路依存性の影響を受けない。よって、厚生の変化を測る上で、理論的に適正な測度であるといえることができる。3 つの貨幣測度が一致する場合、すなわち、消費者余剰を用いても補償変分または等価変分と同じ値を得ることができるのは、 x 財の需要の所得弾力性が 0 である場合である。そのような条件を満たす効用関数は、 x 財以外の特定の財にすべての所得効果が表れる準線型効用関数であり、その場合、理論的に 3 つの測度は一致する。

次に問題となるのは、補償変分と等価変分とでは、どちらが効用の変化を測るのに適しているのかという問題である。支出最小化問題を解くことによって得られる支出関数を用いると、補償変分と等価変分は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} CV &= e(p^1, U^1) - e(p^1, U^0) \\ EV &= e(p^0, U^1) - e(p^0, U^0) \end{aligned} \quad (5)$$

補償変分は、効用の変化を変化後のある価格体系 p^1 で評価する。ここで、効用が U^0 から U^1 に変化することは変わらないが、変化後の価格体系が p^2 であったとすると、同じ効用の変化に対して異なる貨幣換算額が導かれる。よって、同じ効用をもたらす政策代替案が複数あるとき、補償変分ではそれらの政策間に一貫した順序付けができないという問題がある。逆に、初期の価格体系が複数あっても、最終的な変化後の価格体系がひとつであれば一貫した順序付けを行うことができる。これは、 U^1 を

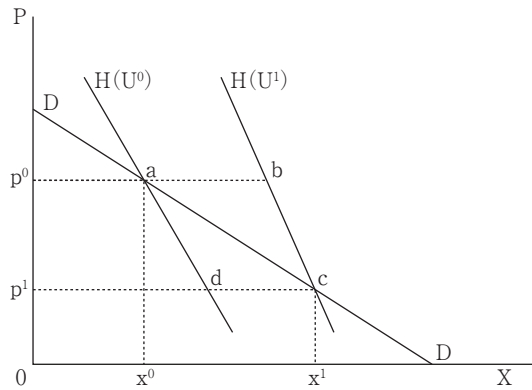


図4 マーシャルの消費者余剰・補償変分 (CV)・等価変分 (EV)

もたらす価格体系 p^1 の状態に至るまでに代替財や補完財の価格変化の経路が複数ある場合、それぞれの経路をもたらす政策代替案を適切に順序付けることができることを表す。

一方、等価変分は補償変分とは反対に、価格変化前の価格体系 p^0 を基準として測るため、同じ効用をもたすが価格体系が異なる複数の代替案を順序づけることができる。しかし、ひとつの価格体系に至るまでの価格変化の経路が複数ある場合、それぞれの政策代替案を適切に順序付けることはできないことになる。

したがって、補償変分と等価変分のどちらが適しているかは政策のタイプによって異なる。例えば、価格変化が複合的に起こるが、政策代替案がひとつしかなく変化後の価格体系が一意に定まる場合には、補償変分が適していると判断することができる。

ところで、補償需要関数による補償変分と等価変分は、理論的には効用の変化を正確に表すことのできる測度である。しかし、ある政策によって市場価格が変化した場合、補償需要関数は実際の市場で観察することができない。一方、マーシャルの需要曲線は、変化前および変化後の需要と価格を観察することによって推定することができる。よって、解決策として、補償変分および等価変分と消費者余剰との差、すなわち所得効果がそれほど大きくなければ、消費者余剰を理論的に正確な補償変分および等価変分の近似として用いることが考えられる。

Willig (1976) は、補償変分および等価変分と消費者余剰との差を推定し、多くの場合、その差は無視し得る程度の大きさであることを明らかにした。よって、実際には、効用変化の測度として消費者余剰が用いても構わないことになる。ただし、所得

への影響が大きいと考えられるような価格変化をもたらす政策については、消費者余剰で近似することによるバイアスが大きくなる可能性があることに注意が必要である。

2.2.2 生産者の厚生

生産者の厚生は、生産者余剰である。生産者余剰は、企業の短期供給曲線と価格で囲まれた部分を表す。

図5は、企業の短期供給曲線を表す。市場価格が平均可変費用（Average Variable Cost：AVC）を上回れば、企業は固定費用がカバーされるため生産を行うことができる。市場価格がAVCに満たない場合には操業を停止する。さらに、市場価格が平均総費用（Average Total Cost：ATC）を上回れば、すべての費用を支払った上で利潤が発生する。供給曲線は、限界費用曲線（Marginal Cost：MC）のAVCを上回る部分となる。市場価格が p^0 のとき、生産者余剰は p^0abp^1 となる。

生産者余剰は市場価格と限界費用との差であるが、これは短期的には企業が固定生産要素を所有していることによって発生する。固定生産要素は、「固定」の名が示すとおり、短期的には供給量が限られているため、所有していると限界費用よりも高い対価を受け取ることができる。限界費用を超過する受け取り分をレントという。短期的には、その固定生産要素を所有している企業にレントが帰属するため、余剰となって表れる。長期的には、固定生産要素は可変生産要素となり、当該企業にとってのレントはなくなる。生産者余剰 p^0abp^1 は、短期であることによって、対価の受取が生産量に応じて発生する費用を超えるために〔生産者に〕発生する準レントを測ったものである。〔長期には、短期において固定生産要素であったものも可変生産要素とな

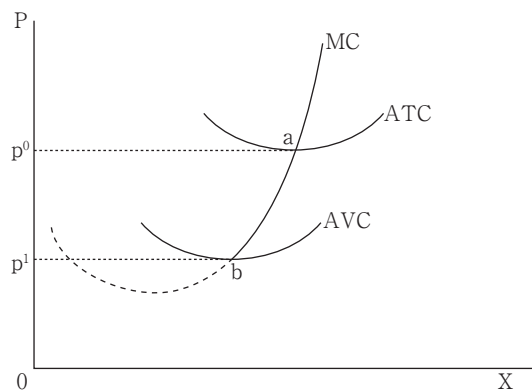


図5 企業の短期供給曲線

り、生産要素の所有者がレントを得ることになる。]

生産者余剰が生産者の厚生を表す測度として適切であるためには、生産要素が完全価格弾力的であるという仮定が満たされなければならない。可変投入物の価格弾力性が無限大であるという仮定が成り立たない場合、生産者余剰は生産者の厚生を表さない。投入量の増加によって生産要素の価格が上昇するとき、企業の限界費用曲線は上方にシフトするため、もとの限界費用曲線は供給曲線を表さないからである。よって、生産者余剰を限界費用曲線によって測るためには、生産要素市場で価格が完全弾力的であることが前提条件となる。例えば、その財の生産のために労働の投入量を変化させても、労働市場における価格（賃金）が変化しないという条件が必要である。

2.2.3 厚生基準と社会的選択

費用便益分析は、ある政策によって社会全体として発生する消費者余剰と生産者余剰の和とその政策による費用とを比較することにより、ある政策の採択を決定することになる。以下では、その決定基準の理論的根拠を示す。

(1) パレート効率性

CBA は資源配分の効率性を測るための評価手法である。最適な資源配分を表す基準をパレート効率性という。パレート効率的な状態とは、少なくとも他の1人の状態を悪くすることなくしては、誰の状態も改善することができないような資源配分の状態と定義される。パレート効率性が達成されるためには、経済活動の生産、交換、分配のそれぞれの局面において効率性の条件が満たされていることが必要である。

①生産の効率性

生産の効率性とは、他の財の生産量を減少させずにある財の生産量を増やすことが

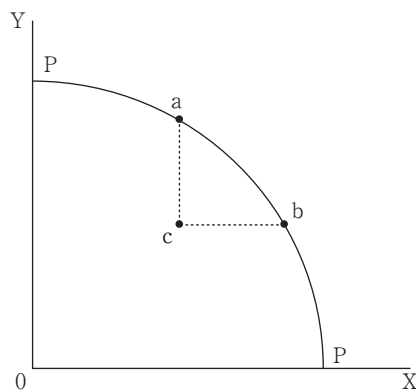


図6 生産可能性フロンティア

できないような資源配分の状態を表す。図 6 はある経済における生産可能性を表す。PP と XY 軸で囲まれた部分は、所与の資源と技術のもとで生産可能な X 財と Y 財の組み合わせを示す。状態 a から状態 b に移るためには、すなわち X 財の生産量を bc 増加させるためには、Y 財の生産量を ab 減少させなければならない。状態 b から状態 a に移るためには、逆に X 財の生産量を減少させなければならない。よって、生産可能性フロンティア PP 上の点はパレート効率的な資源配分を表す。状態 a から状態 b に移るとき、X 財の生産量の増加は、Y 財の生産に投入されるはずであった生産要素を投入することによって達成されと考えられる。すなわち、Y 財が X 財に転換されたとみなし、その割合を X に対する Y の限界転形率 (marginal rate of transformation: MRT_{xy}) という。ある状態の限界転形率は、生産可能性フロンティアの接線の傾きで表される。

②交換の効率性

交換の効率性とは、効率的に生産された財の組み合わせが効率的に配分されることを意味する。すなわち、交換によって、他の人の状態を悪化させることなく、ある人の状態を良くすることができない状態である。

2 人の個人 A, B と 2 財 X, Y の経済を考える。A, B はそれぞれ X, Y の消費量の組み合わせに対する選好を表す効用関数を持っている。効用関数は、同じ効用水準を維持するためには X と Y の限界代替率 (Marginal Rate of Return: MRS) が逓減するという性質を持つとする。すなわち、 MRS_{xy} は、同じ効用水準を保ったまま X の消費を 1 単位増加させるためにあきらめてもいいと思う Y の消費量を表し、かつあきらめる Y の消費量は X の消費水準が高いほど小さくなっていく。

A の MRS_{xy} と B の MRS_{xy} が異なるとき、A と B の間で交換を行うことにより、A か B のどちらか、または A と B の両方の状態が良くなる。A の MRS_{xy} と B の MRS_{xy} が等しくなったときには、それ以上交換をしても必ずどちらかの状態が悪くなってしまう。したがって、 MRS_{xy} が等しくなる資源配分の状態が、交換の効率性が達成された状態である。

③配分の効率性

配分の効率性は、生産の効率性と交換の効率性の両方が満たされており、かつ限界転形率 MRT と限界代替率 MRS が等しい資源配分の状態のときに達成される。

生産可能性フロンティア上のそれぞれの点が表す産出量の組み合わせに対して、それを効率的に交換する方法は限界代替率の数だけ存在する。その中で、限界転形率と等しい限界代替率を持つような A と B の効用の組み合わせは一意に定まる。生産可能

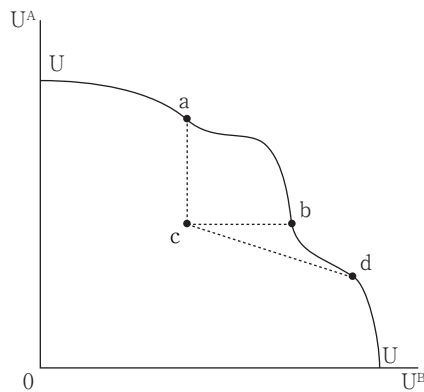


図7 効用可能性フロンティア

性フロンティア上のすべての産出の組み合わせに対して、そのような効用の組み合わせを対応させたのが、効用可能性フロンティアである（図7）。

効用可能性フロンティア UU 上では、 B の効用水準は A の効用水準を下げなければ上げることができない。よって、効用可能性フロンティア上の点はパレート効率的な資源配分を表す。効用可能性フロンティアの内部の点 c はパレート効率的ではなく、 ab 上の点に移動することによって厚生の状態を改善することができる。この状態の変化をパレート改善という。

(2) 潜在的パレート効率性

実際の CBA においては、潜在的パレート効率性が評価の基準となる。ある政策が厚生を増加させるときには、現実には他の人の厚生が犠牲となる場合が多い。パレート効率性の基準を厳密に適用すると、大きな社会的便益が見込まれる政策であっても採択されない可能性が大きい。そのため、より現実的な基準として提唱されたのが、カルドアーヒックス基準である。

カルドアーヒックス基準（仮說的補償原理）：ある政策によって厚生が改善される人が、その政策によって厚生が悪化する人を完全に補償することができ、補償をしてなお改善された状態であるとき、その政策を採択せよ。

カルドアーヒックス基準の概念は、 CBA においては純便益が正となること、すなわち潜在的パレート効率性基準を表す。

潜在的パレート効率性基準：純便益が正となる政策を採択せよ。

ある政策によって損失を被る人がいたとしても、その政策によって便益を受ける人が損失を被る人を補償してもなお正の便益が残るならば、その政策は潜在的パレート

効率性基準を満たすことになる。図 7 における点 c から点 d への変化は、B の効用は増加しているが A の効用は減少しているのでパレート改善ではない。しかし、B の効用の増加は、A が被った効用の減少を補償してもまだ余りあるため、社会全体で享受できる効用は点 c の状態よりも増加している。このような変化を潜在的パレート改善という。

ここで注意すべきことは、仮説的補償原理の名が示す通り、政策の採択の可否を判断するにあたって実際に補償が行われる必要はないということである。仮に補償をした場合の状態が、政策を実施しない場合よりも厚生が改善された状態であると見込まれるならば、実際に補償をしなくても政策を採択する判断の根拠となる。

潜在的パレート効率性基準は、厚生が悪化する人を一人も許さないパレート効率性基準よりも緩い基準である。政策の採択基準として、パレート効率性基準ではなく潜在的パレート効率性基準を用いる理由として、5つの考え方がある。第一に、一人でも厚生が悪化するならば政策が採択されないという条件が緩められることにより、厚生が悪化する人はいるものの、大きな社会的便益を発生させる政策が排除されない。第二に、常に純便益が正の政策を採択し続けていけば社会全体の富が最大化されるため、再分配される富が増加し、最終的には再分配によって厚生の状態が悪化した人も状態が良くなると考えられる。第三に、多くの政策が実施されれば、それぞれの政策によって厚生が改善する人と悪化する人は異なるため、トータルでは個人にとっての厚生の改善と悪化は平均化される。第四に、仮説的に補償が可能かどうかという点のみに注目するため、政策決定過程において、政治的に声の大きいステイクホルダー (stakeholder) にとっての厚生のみが重視されてしまうことを防ぐことができる。そして最後に、個々の政策を効率性基準で採択していれば、公平性のための再分配政策は、個々の政策ごとに配慮する必要はなく一括して行えばよいことになり、行政コストが節約される。

2.3 費用便益分析 (CBA) のプロセス

CBA を実施する際の基本的な流れと留意点を以下に簡単に示す。

(1) 代替案の特定

費用便益分析の対象となる政策、および比較対象とする代替案を特定する。代替案の比較は政策を実施した場合 (With) と実施しない場合 (Without) との比較であり、実施の前 (Before) と後 (After) の比較ではない。

また、政策による費用と便益の及ぶ主体を特定する。政策の影響が、空間的、時間

的にどこまで及ぶとみなすかによって、誰の便益と費用を算入するのかは異なってくる。道路建設の例であれば、受益者である道路利用者は整備対象地域の住民のみか、外部からの旅行者や通過交通等も便益を得るかを特定する。また、道路建設が環境に与える影響が現世代の地域住民だけではなく、将来世代にも及ぶ可能性があると考えられる場合には、将来世代の便益を考慮するか否かを決定する。

(2) 政策のインパクトおよび測定指標の選定

政策がもたらす物理的なインパクト、およびそれを測る指標を特定する。また、政策のインパクトは、多くの場合、複数年にわたって発生するため、政策の効果が持続する期間のインパクトを予測する必要がある。

(3) インパクトの貨幣換算

定量化されたインパクトを貨幣換算する。貨幣換算とは、インパクトを市場における需要、供給、または均衡価格の変化として把握し、その余剰変化を算出することである。市場価格は、インパクトを貨幣換算する際に有用な情報を提供する。しかしながら、市場が不完全競争（例：独占）の場合、市場への政府の介入（例：関税、補助金）がある場合、市場がない場合、には注意が必要である。市場が無いまたは市場が完全ではない場合、観察可能なデータで余剰を把握することができない。このような場合、代替財や資産の市場を代理市場としてシャドウ・プライスを求める方法や、アンケートによって直接的に支払い意思額を求める方法が開発されている。詳しくは、後述する。

(4) 費用と便益の割引

期間にわたる費用と便益を年ごとに足し上げる際には、将来の費用と便益を割り引いて現時点の価値に修正する。これを現在価値（Present Value：PV）という。割引率は「将来利用できる一定量の資源は、現在利用できる同量の資源よりも価値が低い」という考え方を反映している。現在価値の計算式は、以下の通りである。ただし、 B は便益、 C は費用、 t は年、 n は政策の期間、 s は社会的割引率を表す。

$$PV(B) = \sum_{t=0}^n \frac{B_t}{(1+s)^t} \quad PV(C) = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+s)^t}$$

CBA による政策の順位は割引率によって変化することもあり、割引率の選択は重要な意味を持つ。一般に、低い割引率を採用すると、便益が発生する時期に関わらず総便益の高い政策が選ばれ、高い割引率を採用すると、早い時期に便益が発生する政策が選択される。

社会的割引率の値は、概念としては資本の機会費用、および時間選好によって決ま

ることになる。時間選好の考え方によれば限界的時間選好率が、資本の機会費用の考え方によれば民間投資収益率が適切な割引率である。完全市場が成立している場合には、市場利子率と限界的時間選好率、および民間投資収益率は一致するため、市場利子率を用いればよい。しかし現実には課税等により市場に歪みがあり、3つの値は一致しない。どの値を割引率として採用するかについては議論が分かれる。理論的に合意を得た社会的割引率の決定方法はない状態である。

実際には、政策的に定められた値を用いるのが一般的である。現在、アメリカの予算管理局では7%、カナダの連邦債評議事務局では10%、日本では4%といった値が定められている。

(5) 費用と便益の比較

費用便益分析の主たる目的は、資源を効率的に使用する政策の採択を支援することである。その採択基準としては、純現在価値法 (Net Present Value: NPV)、費用便益比率法 (Benefit Cost Ratio: B/C)、内部収益率法 (Internal Rate of Return: IRR) がある。

純現在価値法は、政策の便益の現在価値と費用の現在価値との差であり、以下の式により求められる。

$$NPV = PV(B) - PV(C)$$

政策の NPV が正であれば採択、負であれば非採択の判断 (カルドア・ヒックス基準) がなされる。

費用便益比率法は、政策の便益の現在価値と費用の現在価値との比率、

$$B/C = PV(B)/PV(C)$$

を判断基準とする。すなわち、 B/C が1より大きければ、その政策は採択と判断される。 B/C による政策の順位付けは、NPV による順位付けと異なることがある。例えば、便益が10で費用が1の政策 A と、便益が100で費用が90の政策 B を考えた場合、NPV では政策 B が採択と判断される。一方、 B/C によれば政策 A が採択と判断される。NPV では、費用がかかったとしても社会的により大きな便益が得られるのであれば採択するのに対して、 B/C は社会的な便益の最大化ではなく、より費用効率的な政策を採択する基準となる。よって、社会的余剰を最大にするという政策本来の機能を評価するためには NPV が適切である。製作の費用が固定されている場合には、 B/C による評価の順序付けは NPV によるものと等しくなる。

経済内部収益率 (IRR) とは $NPV = 0$ となるような割引率である。IRR が民間投資収益率等の資本の機会費用より高い場合には、当該政策は資本を他の用途に利用した

場合よりも効率的であることを示し、採択と判断される。IRR による政策の順位付けもまた、政策実施期間にわたる便益と費用の発生パターンによっては NPV と異なる場合があり、必ずしも社会的余剰の最大化を表す指標ではない。むしろ資本投資の効率性を測るのに適した指標であり、融資の評価に適用されることが多い。

(6) 感度分析

感度分析は、インパクトの予測やインパクトの貨幣換算の過程における不確実性に対処するために行う。インパクトの予測値やシャドウ・プライスとして不確実な値しか得られない場合、それらの期待値に幅を持たせてシミュレーションを行い、評価結果の頑健性を検討する。

2.4 便益の評価

便益の評価は支払い意思額（Willingness to Pay：WTP）で測る。しかしながら、市場が不完全な場合（独占の場合、情報の非対称性、外部性、公共財が存在する場合、市場がない場合）には注意が必要である。また、政策のインパクトの波及効果の考慮など実際に便益を評価する際には適切な扱いが必要である。以下では、このうち、インパクトとして重要でありながら市場がない環境の価値の評価法について簡単に述べる。

2.4.1 環境の価値

環境の価値は利用価値と非利用価値からなると考えられている。利用価値は取水やレクリエーションなど実際に利用することに伴う価値である。一方、非利用価値としては、存在価値（環境が保全されて存在しているということへの満足）や遺贈価値（子孫へ環境を残そうということへの意志）があるとされている。

最初に非利用価値を考慮しようとした考え方の出発点は以下のようなものである。つまり、ある人は実際にはその場所に行かなくても、他の人が利用できるような場所が存在し、また、将来世代が利用できるということを知ることによって満足するであろう。Krutilla（1967）は非利用価値として、存在価値（環境資源が存在することに対する支払意思額）、遺贈価値（将来世代に自然資源を賦与することから得られる満足に対する支払意思額）を挙げた。しかし、この非利用価値については、現在でも意見が分かれており、この価値そのものを評価することへの疑問も出されている。用語自体も統一されておらず、利用価値と並んで、存在価値、固有の価値、という表されかたをすることもある。また、経済学者の多くは非利用価値の存在を認め、小さくない値であるとは思ってはいるが言葉の使い方や定義などに疑問を呈示している。特

に、非利用価値を持つにいたる動機やその測定に対して批判的である。

非利用価値についての主としてその測定法に関する問題はあるものの、非利用価値そのものの存在はおおよそ認められているようである。したがって、環境の総経済的価値は、以下のように表される。

$$\text{総経済的価値} = \text{利用価値} + \text{非利用価値}$$

ところで、総経済的価値はいつどのような場合においても評価されるべきものとは考えられない。非利用価値を含む総経済的価値の評価が必要とされる状況は次のような場合とみなされよう。

- 1) 不可逆性があるとき、
- 2) 不確実性があるとき、
- 3) 唯一性が認められるとき、たとえば、絶滅の危機にある種、独特の景観など、である。

2.4.2 環境の経済的評価手法

人々の厚生は、財やサービス（私的財、公共財）の消費ばかりでなく、環境（資源）からの財やサービス（通常これらは非市場財である）の量や質にも依存している。これら財・サービスの変化が人々の厚生にどのような影響を与えるかがその経済的価値を測る基礎となっている。このような厚生変化を測るものとして、消費者余剰、補償余剰（CV）、補償偏差（CS）、等価余剰（EV）、等価偏差（ES）がある。

これらを実際にどのように計測するかということから、環境の経済的評価手法は、（1）環境財と関係のある市場（代理市場）データを用いるもの、と（2）人々への直接質問によって評価を行うもの、とに大きく分けられる

（1）環境財と関係のある市場（代理市場）データを用いるもの（顕示選好法：RP（Revealed Preference）データ）

①費用節約アプローチ（Cost Saving Approach）

都市用水供給の場合には、水源の水質（原水）は生産要素の一つであり、水質の変化によって生産費用は変化する。水質が都市用水の生産において他の生産要素と完全代替財である場合には、原水水質の改善は生産要素投入費用の削減につながる。この費用節約額が水源の環境汚染を防ぐことによる水質改善効果の評価となる。

②回避費用アプローチ（Averting Expenditure Approach）

水源での環境汚染による原水水質の悪化によって水道水に異臭を感じる人が多くなっている。そのため、多くの人々が湯冷ましやミネラルウォーターを利用している。このような行動は異臭味を回避する行動とみなされる。この回避行動と水質が完全代

替であれば、観察可能な回避行動から回避支出額を求め水道水質の経済的評価を行うことができる。

③旅行費用アプローチ (Travel Cost Approach)

人々が湖や河川を訪れるという場合を想定する。水質の改善は人々がそこでレクリエーション活動をしなければ何の価値もない（ここでは利用価値のみ考えている）。もしそうであれば、水質とそこへの訪問回数で測られるレクリエーション活動は弱い補完関係にある。湖や河川的环境汚染による水質の悪化があった場合に水質改善による便益は、水質の改善前と後のその場所への訪問の需要曲線（変数に水質を含む）の間の面積（消費者余剰の差）から求めることができる。

④ヘドニック・アプローチ (Hedonic Approach)

この手法は居住資産価値と環境条件の差に相関が認められる、例えば、きれいな空気という環境質は地価あるいは住宅価格に資本化される（キャピタリゼーション仮説）という点を根拠としている。すなわち、人々は環境のよい（例えば、きれいな空気、土壤汚染がない、浸水の心配がない、など）住居を求めるであろうということから、改善前後の資産データを利用して浸水や環境汚染リスクを測ろうというものである。

地価や住宅価格を被説明変数とし、これを説明する環境質（大気や土壌の質、浸水の可能性、など）を変数とする市場価格関数を推定した上で、そのパラメータから環境質の評価をしようとするものである。

すでに、騒音、大気、水質、廃棄物、緑などのアメニティなどの環境質や社会資本（交通サービス、上・下水道サービス、河川の防災空間、公園などの空間）機能などにヘドニック・アプローチが適用され価値が計測されている。

この手法の適用条件を少し詳しく説明しよう。まず、上述のキャピタリゼーション仮説が成立する条件は、

- 1) 消費者の同質性（すべての消費者が同じ効用関数と所得を持つ）
- 2) 地域の開放性（地域間の移住は自由で移動コストは0）

である。

また、社会資本整備の便益の測定が可能となるのは、つぎのいずれか1つの条件が成立する場合である。

- 1) 社会資本整備プロジェクトが小さく、環境質や社会資本水準の変化が小さい
- 2) 影響を受ける地域の面積が小さい
- 3) 土地と他の財の間に代替性がない。

これらの条件が成立しない場合には、評価値は過大評価になったり、過少評価になったりする。しかし、以上の適用条件はきついで、可能ならば③の旅行費用アプローチなどによる消費者余剰で行う方がよいとされている。

⑤離散的選択モデル法 (Discrete Choice Model Method)

離散的選択モデルはランダム効用理論に基づいている。基本的には③の旅行費用アプローチの発展型であり、以下に述べる CVM あるいはコンジョイント分析とも結合可能である。つまり、データとしては、RP データとともに SP データを用いることも可能である。ランダム効用理論は、完全合理性の仮定に基づいてはいるが、ランダム項の解釈によって、人々の気まぐれを反映するものとなっている。

(2) 人々への直接質問によって評価を行うもの (表明選好法: SP (Stated Preference) データ)

①仮想的市場法 (CVM: Contingent Valuation Method)

仮想的順位法 (CRM: Contingent Ranking Method)、仮想的行動法 (Contingent Activity Method) なども含む。

この手法では、非市場財、すなわち、実際の市場で取引されない財やサービスの貨幣評価を個人に質問する。例えば、環境汚染を低減することに対して個人がどれだけ支払うかが表明されるような市場 (仮想的市場) をつくる。そして、ある特定の場所での水泳や釣りができるようになるような環境汚染の低減案に対する評価を個人に尋ねる。例えば、以下のような質問をする。

環境汚染が低減され、水泳が可能となるような水質に改善されると想定する。この環境汚染低減策に対してどれだけ支払う意思があるか (CV or CS)。

環境汚染低減策が行われないと想定する。このとき、水質の改善後と同じくらいの満足を得るためには最低限どれだけの補償が必要か (EV or ES)。

②コンジョイント分析 (Conjoint Analysis)

これは、様々な属性別に人々の選好を評価する手法の総称である。(2) ①の仮想的順位付け法とはほぼ同じアプローチであるが、より明確に多属性を扱う。

なお、SP データによる方法に関しては、バイアスの存在などさまざまな問題点が指摘されており、その解決のため様々な提案が行われている。したがって、その使用にあたっては十分な注意が必要である。また、RP データが利用可能な場合にはできるだけ RP データを用いる方法の適用を考えるのが望ましい。

2.5 費用・便益分析の限界

(1) カルドアーヒックス基準に対する批判

①公平性

支払い意思額を表す需要曲線は、予算制約のある効用最大化問題の解であることから、富の初期配分に依存して決まる。また、富の初期配分によって、社会の構成員の貨幣の限界効用も異なるものと考えられる。その場合、低所得者と高所得者とは、支払い意思額として示す同じ1万円が同じ価値を表さないことになる。

このとき、受益者から損失を被るものに対して、実際に補償を行うパレート効率性基準が適用されるならば、社会全体の厚生が増加するため問題はない。しかし、CBAで用いられる潜在的パレート効率性基準では、個人の富の配分と貨幣の限界効用が異なる場合、貨幣単位では仮説的に補償すると正の価値があっても、損失を被る人の効用の減少分は受益者の効用の増加分よりも大きいかもしれない。すなわち、潜在的パレート効率性基準では、個人の効用間の比較をしないと、社会全体の厚生が増加するかどうかを判断できない。したがって、政策のインパクトが異なる所得階層にもたらされる場合、潜在的パレート効率性基準に基づくCBAの評価の妥当性は小さくなる。

富の初期配分は、パレート効率性そのものの妥当性にも問題を提起する。政策の結果達成されるパレート効率的な資源配分の状態は、初期の富の配分によって変わる。もともと所得に差のある状態を出発点とした場合、誰の状態も悪化しないことを求めるパレート効率性基準では、必然的に、改善後の状態も依然として高所得者への配分が大きい状態に決まる。このような富の初期配分の影響を問題にする場合、パレート効率性基準は厚生を評価する基準として不完全であり、効用、初期配分、消費を含む社会的厚生関数を用いるべきであるという主張もある。このような社会的厚生関数の表現は、配分の望ましさに対する価値判断を内包する。価値判断は社会の構成員の合意によって形成されるが、アローの不可能性定理によれば、民主主義的手続きによって一意の価値判断（社会的厚生関数）を決めるのは不可能である可能性が高い。

②アローの不可能性定理

費用・便益分析の基礎である経済学では、個人の選好は推移律を満たすものとみなされている。すなわち、推移律を満たす選好とは、YよりXが、ZよりYが好まれるならば、ZよりXが好まれる、という関係が成り立つことである。社会を構成するメンバーの個人的な選好が推移律を満たしていれば、集計された選好は推移律を満たす社会的なランク付けを行えるかという点、それは不可能であることが「アローの

表 1 Arrow の不可能性定理における選好の条件

非限定領域の公理：個人は、推移律を満たすならばどのような選好も持ちうる。
パレート選択の公理：ある選択肢が 2 番目よりも全員一致で選好されるならば、2 番目の選択肢が採択されることはない。
独立性公理：2 つの選択肢の順序付けは、他の選択肢に影響されることはない。
非独裁の公理：ある一人が他の人の選好に対して独裁的な力を持つことはない。

不可能性定理」によって知られている。

「アローの不可能性定理」は、2 人以上が 3 つ以上の政策から選択をしなければならないとき、表 1 の条件を満たさなければならないならば、推移律を満たす社会的順序は保証されないことを証明した。

個人の選好がこれらの条件を満たしている場合、集計された選好による選択肢のランク付けは循環的になってしまう可能性がある。CBA における純便益による意思決定ルールも、個人の選好をベースとして政策のランク付けを行うという点で、不可能性定理が記述する状況と同様である。

純便益による意思決定ルールが推移律を満たす社会的順序付けを保証するためには、さらに条件が必要である。需要曲線の背後にある個人の効用関数の領域条件は、正かつ限界効用が逓減することであるが、これだけでは不十分である。さらに、個人の効用関数は、個人の需要関数が所得の合計によって市場需要関数に集計されることが必要とされる。そのためには、2 つの条件が成立していなければならない。すなわち、すべての個人の財に対する需要は所得の増加に対して線形的に増加し、その増加率は個人間で等しいこと、また、個人はすべて等しい価格集合に直面していることである。後者は、市場で取引されている財については妥当であるが、前者は厳しい仮定である。この意味で、需要曲線で表される支払い意思額は、政策の相対的な効率性を測る基準として完全ではない。

CBA で政策の効率性を評価すること、すなわち支払い意思額によって把握した純便益を効率性基準として用いるということは、個人の選好が、集計需要関数が存在できるような条件を満たしていることを暗に仮定していることに留意する必要がある。

(2) CBA に対する他の批判

CBA に対する多くの批判は、上述のように CBA が効率性に偏った判断を示すものであり、公平性への配慮が足りないというものである。しかしながら、他の点についても CBA の限界が示されている。例えば、ある政策によるインパクトが環境に及ぶ場合、環境の質のように市場が成立しない財の貨幣的評価に関しては、1.4 で示し

たように様々な評価法が提案されている。しかしながら、今現在、多くの人々が納得する評価法は示されていないといえよう。また、インパクトをすべて貨幣で評価することや、貨幣で評価できない多様なものの評価を **CBA** では扱うのが難しいということ。さらに、蓄積性を有するものや間接的インパクトの扱い、不確実性の扱い、などに関して適切な扱いがなされているか、また、このようなインパクトがある場合に割引率を用いることが適切か否かという点に疑問が投げかけられている。

3 多基準分析

近年、社会の多様化を背景として、貨幣換算が容易でない非市場財の存在を分析評価に組み入れることが要請されるようになってきた。また、さまざまなステイクホルダーによる基準や評価を考慮することの必要性が高まってきた。つまり、複数の目的、多様な（重要度の違いや階層構造を有する）目的（基準）、効率性ならびに公平性の観点、をどのように取り込むかという問題意識が芽生えてきた。そこで、複数の目的（基準）をそのままの尺度で評価し、それを何らかの方法で統合しようという多基準分析（**MCA: Multi-Criteria Analysis**）が注目されつつある。近年では、最終的に統合するかどうかは別として、評価項目のうち貨幣評価を含む定量的評価が困難な項目については定性的評価で行う多基準分析がイギリス、オランダ、フランス、ベルギーといったヨーロッパの国々で適用されてきており、その中では、費用便益分析は評価項目の一部として扱われている。

しかし、多基準分析と呼ばれている分析の範疇には様々な手法が含まれており、その分析手順、理論的根拠、内在する問題点等も一様ではない。そこで本節では、「多基準分析」手法を「多基準分析とは、複数の基準で代替案を評価し、意思決定を支援しようとする分析手法」とであると定義したうえで、まず、多種多様な多基準分析手法を概観し、意思決定支援手法としての可能性を探ることとする。

3.1 多基準分析手法の概観

3.1.1 多目的最適化モデル

(1) 効用最大化モデル (Utility maximization model)

効用（あるいは厚生）モデルは、関連する目的関数（あるいは決定基準）のすべての組がウェイト付けによって先験的に効用関数に統合されうるという仮定に基づいている。

$$\max \quad \phi(w_1, \dots, w_J)$$

s.t.

$$g_k(x_1, \dots, x_I) \leq \bar{g}_k, \forall k$$

ただし, $x_i (i=1, \dots, I)$ は決定変数。 $w_j (j=1, \dots, J)$ は目的関数。 $g_k (k=1, \dots, K)$ は決定変数に関する制約条件。 ϕ は決定基準集合を効用関数に写像するスカラー値効用 (あるいは厚生) 関数のマスター・コントロールである。この写像は, ウェイト付けに基づいている。このモデルはいくつかの決定基準間のトレード・オフ (限界代替率) を先験的に特定化することが必要である。

写像の特定化の一つは, 各目的関数の線形ウェイト和によるものであり, 次のように表される。

$$\max \quad \phi = \sum_{j=1}^J \lambda_j w_j$$

s.t.

$$g_k(x_1, \dots, x_I) \leq \bar{g}_k, \forall k$$

ただし, λ は以下の条件を満たすウェイト集合である。

$$J \sum_{j=1}^J \lambda_j = 1, \lambda_j \geq 0$$

目的関数間のトレード・オフ λ_j の決定はかなり困難ではあるが, 意思決定者とのやりとりによってトレード・オフを把握することは可能である。

(2) ゴール・プログラミング・モデル (Goal programming models)

ゴール・プログラミングの定式化は以下のとおりである。

$$\min \quad \chi = \sum_{j=1}^J (w_j^+ + w_j^-)$$

s.t.

$$g_k(x_1, \dots, x_I) \leq \bar{g}_k, \forall k$$

$$w_j - w_j^+ + w_j^- = w_j^*, \forall k$$

ただし, w_j^* は各目的関数の望ましい水準を, そして, w_j^+ と w_j^- は, w_j^* に関して w_j の過大達成値と過小達成値を表している。

(3) 階層最適化モデル (Hierarchical optimization models)

階層最適化モデルは, 異なった目的関数のすべての集合は相対的優先度の低下とともに順位付けられるという仮定に基づいている。(意思決定者によって特定化される) 決定基準の階層的順位付けの後, 低位の目的関数は高位の目的関数の後でのみ考察されるという最適化手順が実行される。明らかに, この手順においては, w_1, w_2, \dots, w_J と表される両立しない目的関数についての相対的優先度に関する情報が必要である。

階層最適化手順は以下のような継続的段階で表される。

$$\left\{ \begin{array}{l} I \left\{ \begin{array}{l} \max w_j(x_1, \dots, x_l) \\ \text{s.t.} \\ g_k(x_1, \dots, x_l) \leq \bar{g}_k, \forall k; \end{array} \right. \\ \\ II \left\{ \begin{array}{l} \max w_2(x_1, \dots, x_l) \\ \text{s.t.} \\ g_k(x_1, \dots, x_l) \leq \bar{g}_k, \forall k \\ w_1(x_1, \dots, x_l) \geq \beta_1 w_1^0; \end{array} \right. \\ \\ III \left\{ \begin{array}{l} \max w_j(x_1, \dots, x_l) \\ \text{s.t.} \\ g_k(x_1, \dots, x_l) \leq \bar{g}_k, \forall k \\ w_1(x_1, \dots, x_l) \geq \beta_1 w_1^0 \\ w_2(x_1, \dots, x_l) \geq \beta_2 w_2^0; \end{array} \right. \end{array} \right.$$

等々。ただし、 w_1^0 と w_2^0 はステップ I, II で達成される w_1 と w_2 の最適値である。また、 β_1 と β_2 ($\beta_1, \beta_2, < 1$) は w_1 と w_2 の値のある一定の許容領域を限定している。すなわち、この許容値意思決定者によって許容される w_1^0 と w_2^0 の最大限の減少幅を表している。

以上の他にも多目的最適化モデルとしては、ペナルティー・モデル、ミニ・マックス・モデル、パレート最適モデルなどがある。

3.1.2 多属性効用理論

(1) 期待効用理論と効用関数

人間の価値観を定量化することを目的とした効用理論の歴史は、1783年に聖ペテルスブルグの逆説を記述的に説明しようとした D. ベルヌーイにさかのぼる (Luce and Raiffa, 1957)。人々の行動原理として、ベルヌーイは「人々は期待金額を最大化して行動しているのではなく、期待効用を最大化している」と説明し、お金に対する効用関数として対数関数を提案した。ただし、1) この効用関数をどのようにして測定するのか。2) なぜ期待効用が人々の合理的な行動の規範となるのか。についてはふれなかった。ベルヌーイのモデルは、人々の行動原理に関する一種の記述的モデル (descriptive model) と考えることができる。

Von Neumann and Morgenstern (1947) はいくつかの公理 (5つ) を設定し、期待効用最大化が人々の合理的行動の規範となることを証明して、初めて規範的モデル (normative model) を与えた。

さて、ここで、意思決定者 (DM) が選択することができる代替案の集合を $A = \{a, b, \dots\}$ とする。DM が代替案 $a \in A$ を選択したときに、結果 x_i が得られる確率を p_i 、代替案 $b \in A$ を選択したときに結果 x_i が得られる確率を q_i とし、起こりうるすべての結果の集合を

$$X = \{x_1, x_2, \dots\}$$

とする。このとき、

$$p_i \geq 0, q_i \geq 0, \dots \forall i \\ \sum_i p_i = \sum_i q_i = \dots = 1$$

を満たす。また、 X 上の効用関数を $u: X \rightarrow R$ とするとき、代替案 a, b, \dots を採用したときの期待効用は、おのこの

$$E_a = \sum_i p_i u(x_i), E_b = \sum_i q_i u(x_i), \dots$$

で与えられる。このように、結果が一つの属性によって規定されるとき、 $u(x)$ を単属性効用関数という。

(2) 単属性効用関数の同定

「DM が、くじ l_a の好ましさと、確実な結果 \bar{x} の好ましさが無差別であると考えるとき、 \bar{x} をくじ l_a の確実同値額という」 $p=0.5$ のとき、このくじを 50-50 くじとよび、 $\langle x^*, x^0 \rangle$ と表す。50-50 くじをいくつか用いることによって、単属性効用関数を用意に同定することができる。

(3) 多属性効用関数

結果 $x \in X$ が n 個の属性 X_1, X_2, \dots, X_n によって特長づけられているものとする。現実には多目的評価における複数の評価項目がこれに相当する。

n 属性効用関数を直接求めるには、複数の属性を同時に考慮してくじに関する選好判断をしなければならず、実際にはほとんど不可能である。そこで、DM の選好に関して複数の属性間に種々の独立性や依存性を仮定して、直接測定すべき効用関数の属性の次元を減少させる分解表現を求めることが重要な課題となる。種々の独立性の中で、最もよく実際に適用されてきたのは Keeney and Raiffa (1993) の効用独立性とその特別な場合としての加法独立性 (Fishburn, 1965) である。

(4) 効用独立性・加法独立性と分解表現

選好独立性 (Keeney and Raiffa, 1993) は次のように定義される。

『定義 1』選好独立性 (preferential independence)

「 X_i が X_j に選好独立であるとは、 $x_i \in X_i$ の変化による選好順序が、条件のレベル $x_j \in X_j$ に依存しないことを意味する。その性質を $X_i(PI)X_j$ と表す。これより、 $X_i(PI)X_j$

ならば、任意の $x_i^1, x_i^2 \in X_i$ と、ある $x_j^1 \in X_j$ に対して

$$(x_i^1, x_j^1) \succeq (x_i^2, x_j^1) \Rightarrow (x_i^1, x_j) \succeq (x_i^2, x_j), \quad \forall x_j \in X_j$$

を満たす。」

『定義2』 効用独立性 (utility independence) (Keeney and Raiffa, 1993)

「 r 属性空間 X_r が $(n-r)$ 属性空間 X_i に効用独立であるとは、 X_i のレベルのある値 $x_i \in X_i$ に固定して、 X_r 上に任意に与えられた二つのくじを考えると、その選好順序が固定した条件レベル $x_i \in X_i$ に依存しないことを意味する。この性質を X_i (UI) X_i と表す。」

『定義3』 加法独立性 (additive independence) (Fishburn, 1965 ; Keeney and Raiffa, 1993)

「属性 X_1, X_2, \dots, X_n が加法独立であるとは、 X 上に任意に与えられた2つのくじを考えると、その選好順序が X 上の結合確率分布に依存せず、各 X_1, X_2, \dots, X_n 上の周辺確率分布にのみ依存することを意味する。」

一般に、評価項目（属性）が複数個あって、総合的な評価を行うときに、各評価項目の重み付き和によって評価することが多い。これは、各評価項目間に暗に相互効用独立性はもちろんのこと、さらに厳しい加法独立性を仮定していることを意味する。このような仮定をおくということは、各評価項目間の相互作用をいっさい認めないことを意味し、現実の選好状況を反映しない場合が多い。

2つの属性 X_1, X_2 が加法独立のとき、次の2つの50-50くじの間で、

$$\langle (x_1^0, x_2^0), (x_1^*, x_2^*) \rangle \sim \langle (x_1^0, x_2^*), (x_1^*, x_2^0) \rangle$$

という無差別関係が成立することになるが、以下の場合には加法独立性が成立しない。

例1 「 X_1 : 経済消費レベル, X_2 : 環境汚染レベル, とすると、左辺の50-50くじは、経済消費レベルも環境汚染レベルも共に最悪な状況と両者が共に最良の状況とがおのおの0.5の確率でえられるくじを表し、右辺は、どちらか一方が最良で他方が最悪の状況がおのおの0.5の確率で得られるくじを表している、 X_1, X_2 が加法独立のとき、これらの二つのくじが同程度に好ましいことを意味するが、現実には大方の人々は、右辺のくじをより好ましいと思うのではなかろうか。」

例2 「ある災害に対する公共的リスクを評価するものとして、 X_1 : A氏が受ける被害の度合い, X_2 : B氏が受ける被害の度合い, とすると、左辺の50-50くじは、A氏とB氏が共に多大の被害を受ける状況と両者が共になんら被害を受けない状況と

がおのおの 0.5 の確率で起こるくじを表し、右辺は、A 氏か B 氏のどちらか一方が多額の被害を受け、他方がなんら被害を受けない状況とがおのおの 0.5 の確率で起こるくじを表している。このとき、公共的リスクの公平性 (equity) (Keeney and Winkler, 1985) という立場からが、左辺のくじのほうが好ましいことは明らかであり、二つの属性 X_1 と X_2 の間の加法独立性は成立していない。」

SMART (simple multiple attribute rating technique) は和の形を作るひとつの方法を提示している。エドワーズ (Edwards, 1971, 1977) は心理学的方向の意思決定研究から S M A R T (Simple Multi-Attribute Rating Technique) を開発し、S M A R T S (SMART using Swings), さらに S M A R T E R (SMART Exploiting Ranks) に発展していく。

(5) 合理的意思決定のパラドックス

MAUT の主たる問題は、効用関数を導くために満たさなければならない強い仮定である。基本的に、CBA における社会的厚生理論と同じ公理を拠り所としている。それゆえ、CBA に向けられる批判の多くが MAUT にも向けられる。

合理的意思決定モデルと考えられている期待効用モデルと現実の意思決定の乖離をパラドックスという。以下にパラドックスの例を示す。

①選好の非独立性

期待効用モデルの中で最も重要な役割を果たしている公理が独立性公理である。この公理により、代替案 (例えば、確率分布で表される) の効用は、得られる可能性のある結果の効用の期待値で表すことができる。

独立性公理が成立しない現象は、確実性効果 (certainty effect) や共通帰結効果 (common consequence effect) と呼ばれている。Allais のパラドックスは確実性効果の例である。たとえば、つぎのような 2 つの確率分布の間の選好を考える。

P: 確実に 1 億円を得る。

Q: 確率 0.98 で 3 億円を得、確率 0.02 でなにも得られない。

この場合、確実に 1 億円を得られる確率分布 p の方が多くの人にとって魅力的となる。

②確率の非加法性

リスク下における独立性公理が成立しない種々の現象は、不確実性下の意思決定問題として定式化しなおすことにより、不確実性下の独立性公理が成り立たない現象とみなすことができる。不確実性下とリスク下での意思決定の違いは、リスク下では事

象の生起する確率が与えられているのに対して、不確実性下では明確に与えられていない。このあいまい性に起因した選好判断による独立性の不成立が起こる。エルズバークパラドックス。

③選好の非推移性

a. 非推移的無差別

推移性には、無差別関係 \sim の推移性と、強選好関係 $>$ の推移性がある。

人間の識別能力の限界からくる非推移的な無差別関係の例 (Luce, 1956)

コーヒーの例：砂糖 x 粒入りのコーヒー \sim 砂糖 $x+1$ 粒入りのコーヒー

砂糖 $x+1$ 粒入りのコーヒー \sim 砂糖 $x+2$ 粒入りのコーヒー

...

砂糖 $x+n-1$ 粒入りのコーヒー \sim 砂糖 $x+n$ 粒入りのコーヒー

\sim が推移的であれば、

砂糖 x 粒入りのコーヒー \sim 砂糖 $x+n$ 粒入りのコーヒー

が成立することになるが、 n が非常に大きい場合には不合理。

b. 選好サイクル

一般に n 個の代替案 a_1, \dots, a_n に対して、 $a_i > a_{i+1} (i=1, \dots, n+1)$ であるのもかわらず、 $a_n > a_1$ となると、選好サイクルが存在するといわれる。

c. 選好反転現象

たとえば、ギャンブルどうしの選好比較はギャンブルの確率によりおもに決定される一方。値付けは得られる利得額や失うであろう損失額によりおもに影響される。

④フレーム効果

人々は利得に対するのとは異なった仕方でも損失に反応し、質問の仕方がその答えに影響を及ぼす。

(6) 環境影響評価への応用

2 属性効用関数の同定

結果 $x \in X$ が、たがいに競合した2つの属性 Y と Z によって特徴づけられているものとする。このとき、 x は順序対 $(x = (y, z), y \in Y, z \in Z)$ で表すことができる。起こりうるすべての結果の集合 X は、直積集合 $X = Y \times Z$ で表される。2属性空間。

多属性効用関数を同定する場合、一度にこれを求めることは困難であるので、各属性間に種々の独立性を仮定して、直接に測定する効用関数の属性数を減らす分解表現を求める必要がある。

属性間に効用独立性（加法独立性）が成立する場合には、一方の項目（例えば、騒

音 (z) のレベル) を固定し、評価対象の項目 (大気汚染濃度 y) について、确实同値額 $y_{0.5}$, $y_{0.25}$, $y_{0.75}$ を質問する。これにより、大気汚染濃度に対する単属性効用関数が求められる。騒音についても同様に、単属性効用関数 $u_1(y)$ を求めることができる。

多属性効用関数を同定するには、各属性の重み係数を求めて、それを各単属性効用関数に乗じて加えればよい。例えば、大気の重み係数は、大気が最良で騒音が最悪な状態を考え、つぎに、両項目とも最良にある確率が p で両項目とも最悪にある確率が $(1-p)$ である状態を考え、両者が無差別である確率値 p を質問する。この値 p が大気汚染の重み係数となる。これは、2 属性空間の隅の効用値について質問することを意味する。騒音の重み係数についても、同様に求めることができる。

(7) グループ効用関数

これまでの議論では、ひとりの DM あるいは同じ選好構造をもった 1 グループの選好に関する情報をもとにして、その多属性効用関数をもとめるための分析を試みた。しかし、現実の意思決定問題においては、DM が複雑で、しかもその間に利害の対立が見られるような場合を扱わなければならないことが多い。このためには、集団意思決定の理論が必要である。多属性効用理論を集団意思決定の理論に延長するとすれば、各 DM の多属性効用関数を集約することによってグループ効用関数を構成することが考えられる。Keeney and Kirkwood (1975) は、この考え方のもとで、異なった DM の効用レベルの間に効用独立性を仮定してグループ効用関数の分解表現を提案した。

3.1.3 価値関数 (Multiple attribute value theory: MAVT)

価値関数といえば、かつては序数的価値関数として、序数的効用を指す言葉として用いられてきた。しかし、Dyer and Sarlin (1979) によって基数的価値関数の存在が示されたので以下ではこれを価値関数とよぶ。また Keeney and Raiffa (1993) によってその作成方法が示されたのでこれらを説明する。

いま、結果 $x \in X$ が n 個の属性 X_1, \dots, X_n によって特徴付けられているものとし、

$$X^* = \{x_1 x_2 \mid x_1, x_2 \in X, x_1 \succeq x_2\}$$

を $X \times X$ の部分集合とする。そして、 \succeq^* を X^* 上の 2 項関係とする。ここで、 \succeq^* は X^* 上の選好強さを表し、

$$x_1 x_2 \succeq^* x_3 x_4 (x_1, x_2, x_3, x_4 \in X, x_1 \succeq x_2, x_3 \succeq x_4)$$

は、「 x_2 に対する x_1 の選好強さは、 x_4 に対する x_3 の選好強さよりも大きいか等しい」

ことを意味する。そして、 X, X^*, \succeq^* が正選好構造をとると仮定すれば、任意の $x_1, x_2, x_3, x_4 \in X$ に対し

$$x_1 x_2 \succeq^* x_3 x_4 \Leftrightarrow v(x_1) - v(x_2) = v(x_3) - v(x_4)$$

を満たす X 上の実数値関数 v が存在する。さらに、

$$x_1 x_2 \succeq^* x_2 x_3 \Leftrightarrow x_1 \succeq x_2$$

と定義することにより、

$$x_1 \succeq x_2 \Leftrightarrow v(x_1) \geq v(x_2)$$

を得るので、 v は X 上の選好関係をも表している。さらに、正選好差構造を満たす v は正線形変換の範囲で一意的である。この v のことを、基数的価値関数（以下価値関数）と呼ぶ。

Keeney and Raiffa. (1993) によれば、価値関数は以下の手順で作成される。

- ①評価基準の値 x の変域 ($x^0 < x < x^*$) を設定し、 $v(x^*) = 1, v(x^0) = 0$ のように正規化する。
- ②この x の変域内の点 x^m で、 x^0 であるときに x^m になることと、 x^m であるときに x^* になることが無差別となる点（価値中点）を意思決定者に尋ね、この x^m に対応する価値 $v(x)$ の値を 0.5 とする。
- ③同様にして x^0 と x^m の価値中点 $x^{0.25}$ を求め $v(x^{0.25}) = 0.25$ とし、 x^m と x^* の価値中点 $x^{0.75}$ を求め $v(x^{0.75}) = 0.75$ とする。順次同様に価値中点を求めていく。適当なところでこれらの価値中点を滑らかな曲線で結べば価値関数が得られる。

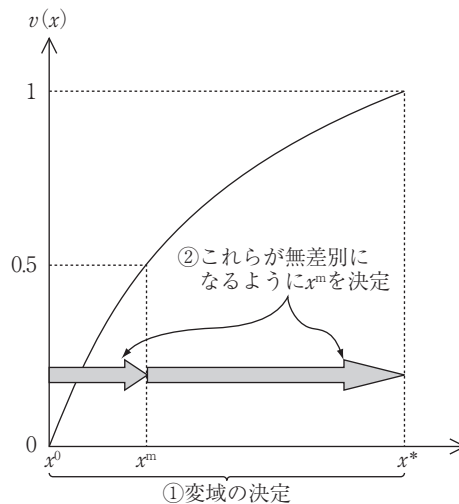


図8 価値関数の作り方

しかしステイクホルダーごとに異なる価値関数を構築する場合にこの手法を適用すると、以下のような問題点が生じる。

(1) ステイクホルダー間で整合性のとれた価値関数の決定ができない。

(2) 価値中点を尋ねるための質問が分りにくい。

(1) の問題点に関して、Keeney and Raiffa の手法では、評価基準ごとに独立に変域が決定されるため、それによって得られる各ステイクホルダーの価値関数は整合性がとれていると言えるのかどうか不明である。

3.1.4 AHP (Analytical hierarchy process)

シンプルな AHP は 3 つのステップからなる階層構造を有している。最上位には意思決定問題における主目的 (目標と呼ばれる) が示される。ついで、第 2 と第 3 は基準 (評価項目) と代替案から成る。もちろん、もっと複雑な階層構造の構築も可能である。AHP は、この階層構造における評価項目の重要度から代替案を評価する。すなわち、基準間と代替案間におけるそれぞれの一対比較をもとにウェイトとスコアを引き出す手法であり、サーティによって 1980 年に考案された。

AHP は、人間の直感を、数量的に転換する手法として広く適用され、ANP (Saaty, 1996) や支配型 AHP (木下・中西, 1997)、REMBRANDT (Lootsma, 1992) といった発展的手法も開発されてきている。

しかしながら、一対比較の際に用いられる 1-9 のスケールに関する問題点 (A と B とが 1:3 の関係、B と C が 1:5 の関係にあるとき、A と C が 1:15 になるということが、不可能である、など) や新たな代替案の導入によってもととの代替案のいくつかの順位を変えてしまうという' 順位の逆転現象 'があり得る、ということから AHP の使用には注意を払うことの必要性も指摘されている。

3.1.5 アウトランキング手法—コンコーダンス分析

アウトランキング手法は、'アウトランキング (優越)' の概念によるものであり、1960 年代にフランスでロイ (Roy, B.) が中心となって開発され、主にヨーロッパ大陸において適用され広められてきた手法である。アウトランキング手法としては、ELECTRE (Benayoun et al., 1966, Roy, 1968 等)、コンコーダンス分析 (Nijkamp, 1975)、PROMETHEE (Brans, 1985) などがある。コンコーダンス分析は、エレクトル法をもとにネイカンパ (Nijkamp, P.) がオランダで開発した手法であり、定性的なデータのインプットによるアウトランキングの手順を提供している。

コンコーダンス分析は最初、フランスで発展した (フランスではコンコーダンス分析は通常エレクトル (Electre) 法 (Elimination et choix traduisant la realite) と呼ばれ

ている)。費用便益分析との共通の特徴は、代替計画案の関連決定基準の結果（複数）を統合する計画インパクト行列から出発することである。しかしながら、コンコーダンス分析のウェイト付け体系は費用便益分析の貨幣尺度とは非常に異なっている。ウェイト付け体系の導入は、各一对の計画案に対して別々にコンコーダンス尺度とデイスコーダンス尺度を構築し、それに基づいて代替計画に関する総体的（一对）選好を行うことを意味している。以下では、簡単にコンコーダンス分析の段階を示す。

(1) インパクト行列

つぎのようなインパクト行列を構築する。

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & z_{1I} \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ z_{J1} & & & & z_{JI} \end{bmatrix}$$

ただし、 z_{ji} は計画 i に関する j 番目の決定基準の結果を表している。 Z の要素は間隔または比率尺度の適切な単位で測定される。決定基準についての結果のいかなる変化も当該決定基準に関して負か正の効果を持つと仮定されるだけである。

(2) 基準化

基準化の方法を2つ以下に示す。

①ベクトルの基準化

Z の各行ベクトルをそのノルムによって除す。基準化された計画インパクト r_{ji} は次のように決定できる。

$$r_{ji} = \frac{z_{ji}}{\sqrt{\sum_{i=1}^I z_{ji}^2}}$$

これは基準化された行列のすべての行ベクトルが同じ（ I という）長さをもつことを意味する。

②線形尺度変換

単純な変換は当該基準に関する最大の結果で各結果を除すことである（少なくともその基準が便益基準と定義される場合）。すなわち、

$$r_{ji} = \frac{z_{ji}}{z_j^{\max}}$$

ただし、 z_j^{\max} は次のように定義される。

$$z_j^{\max} = \max_i z_{ji}$$

費用基準の場合は次のような尺度変換が採用される。

$$r_{ji} = 1 - \frac{z_{ji}}{z_j^{\max}}$$

(3) ウェイト付け体系

各基準 j に対して相対的ウェイト w_j は以下の加法条件が満足されるように決められる。

$$\sum_{j=1}^J w_j = 1$$

しかしながら、このウェイトの決定は簡単ではない。

(4) コンコーダンスおよびディスコーダンス集合

コンコーダンス集合は代替プロジェクトの対比較に基づいて作られる。計画 i と i' ($i, i' = 1, \dots, I; i \neq i'$) (の各一対に対して、決定基準の集合は 2 つの部分集合に分けられる。すなわち、コンコーダンス集合とディスコーダンス集合である。計画 i' に関する計画 i のコンコーダンス集合 $C_{ii'}$ は計画 i が i' より選好されるすべての基準 j から構成される。すなわち、

$$C_{ii'} = \{j | z_{ji} \succ z_{ji'}\}$$

ただし、記号 \succ は (強い) 選好関係を示している。コンコーダンス集合のもう一つの定義は次のようなものである。

$$C_{ii'} = \{j | r_{ji} > r_{ji'}\}$$

補集合はディスコーダンス集合と呼ばれる。これを

$$C_{i'i} = \{j | z_{ji} \prec z_{ji'}\}$$

と定義する。同様の定義は

$$D_{ii'} = \{j | r_{ji} \leq r_{ji'}\}$$

で示される。

(5) コンコーダンス行列

計画 i がより多くの基準に関して計画 i' に優越すれば $C_{ii'}$ はより多くの要素を含むことは明らかである。そこで、相対的優越性は次のコンコーダンス指標 $c_{ii'}$ によって示すことができる。

$$c_{ii'} = \sum_{j \in C_{ii'}} w_j, i \neq i'$$

すなわち、 i' 計画 i に関する計画のコンコーダンス指標は、計画 i' に関する計画 i のコンコーダンス集合に含まれる基準につけられたウェイトの合計に等しい。したがって、計画 $c_{ii'}$ の値が大きいことはコンコーダンス集合に含まれる基準に関して、計画 i が i' より選好されることを意味している。もし、 $c_{ii'} = 1$ ならば、計画 i は i' より完全に優越する。また、もし $c_{ii'} = 0$ ならば、計画 i はいかなる基準に照らしても i'

より劣る。

コンコダンス指標 $c_{ii'}$ ($i, i' = 1, \dots, I; i \neq i'$)

は以下のように（非対称的な）コンコダンス行列 C と表することができる。

$$C = \begin{bmatrix} - & c_{12} & \cdot & \cdot & c_{1I} \\ c_{21} & - & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ c_{I1} & \cdot & \cdot & \cdot & - \end{bmatrix}$$

(6) デイスコダンス行列

2つの計画 i と i' を比較すると、一般に計画 i のいくつかの結果は i' より優れているが他の結果では i が i' より劣るという結論が得られる。したがって、 i の i' に対する相対的優越性に関する尺度に加えて、計画 i が i' より劣ることを示す指標を定義できる。すなわち、

$$d_{ii'} = \max_{j \in C_{ii'}} \left(\frac{|z_{ji} - z_{ji'}|}{d_j^{\max}} \right)$$

ただし、 d_j^{\max} は以下のように定義される。

$$d_j^{\max} = \max_{0 \leq i, i' \leq I} |z_{ji} - z_{ji'}|$$

$0 \leq d_{ii'} \leq 1$ である。計画 i の i' との差が最大るとき $d_{ii'} = 1$ となり、差が最小のとき $d_{ii'} = 0$ となる。デイスコダンス指標 $d_{ii'}$ は以下のように（非対称的な）デイスコダンス行列を構成する。

$$D = \begin{bmatrix} - & d_{12} & \cdot & \cdot & d_{1I} \\ d_{21} & - & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ \cdot & & & & \cdot \\ d_{I1} & \cdot & \cdot & \cdot & - \end{bmatrix}$$

行列 C と D は異なった情報を含む。すなわち、 C は決定基準に関する相対的優越性に関するものであり、 D はプロジェクトの結果の差に関するものである。

(7) コンコダンス優越指標

コンコダンス指標 $c_{ii'}$ と $c_{i'i}$ の差は、ウェイトで測られた計画 i の計画 i' に対する絶対的優越性の尺度と考えられる。これより、計画 i の他のすべての計画に対する優越指標は次のように定義される。

$$c_i = \sum_{\substack{i'=1 \\ i \neq i'}}^I c_{ii'} - \sum_{\substack{i'=1 \\ i \neq i'}}^I c_{i'i}$$

正の c_i は計画 i の他のすべての計画に対しての優越性を反映しており, c_i が大きいほど強い優越性を有していることを示している。したがって, コンコダンス情報に基づいて選択される最適な計画は, $\max_i c_i$ という条件を満足する。

(8) ディスコダンス優越指標

(7) と同様に, ディスコダンス優越指標を次のように定義できる。

$$d_i = \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^I d_{ir} - \sum_{\substack{r=1 \\ r \neq i}}^I d_{ri}$$

ディスコダンス優越性の下では, ある計画を選択するための最終的選択基準は, $\min_i d_i$ である。

(9) 消去と選択

上記の手順によって, c_i の値が小さく, かつ, d_i の値が大きい計画はより望ましくない計画として消去される。逆に, 最も望ましい計画の選択基準は, コンコダンスならびにディスコダンス優越指標の両者で最も大きい平均順位を有する計画を選ぶということである。

以上の手順の拡張としては, 線形ウェイトではなく, 非線形ウェイトを付けるものや, 多数グループ問題への対応などが挙げられる。後者については, たとえば, 利害集団の相対的人数をパラメータ μ_k で表すと基準に付けられる純ウェイトは次のように計算できる。

$$w_j = \sum_{k=1}^K \mu_k w_j^k$$

ただし, μ_k は次の条件を満たす。

$$\sum_{k=1}^K \mu_k = 1$$

3.1.6 線形加法モデル

基準が相互に独立であると証明されるか論理的に想定され, また, 不確実性が明確に組み入れられていなければ, 単純な線形加法モデルが適用できる。

モデルは以下のように表される。

$$S_i = w_1 s_{i1} + w_2 s_{i2} + \cdots + w_j s_{ij} = \sum_{j=1}^n w_j s_{ij}$$

ただし, S_i は代替案 i の総スコア, s_{ij} は代替案 i の基準 j における選好スコア, w_j は各基準のウェイトである。

線形加法モデルは直感的でわかりやすく, 多基準分析の中心となっている。しかし一方で, その使いやすさのために誤用される可能性もある。誤用を避けるためには, 基準の相互独立性が確保された上で, スコアとウェイトのインプットが信頼のおけるものでなくてはならない。

加法モデルについては、相互効用独立性と加法独立性を仮定しているため、現実の選好状況を反映しない場合が多く、記述的モデルとしては問題が多いことが指摘されている（田村，他 1997 参照）。

3.1.7 その他の手法の開発

上記の他にも様々なタイプの多基準分析手法がある。‘Preference cones’ は、Zionts and Wallenius（1976）、Köksalen 他（1984 他）らによって開発された手法であり、ZAPROS は定性的判断による選好順序のインプットをもとにした多基準の選択問題を支援し、ロシアで開発された（Larichev 1982 他）。不確実な選好のインプットを受け入れる手法としては、多属性効用理論の枠組みの中で米国において開発されたシステムである ARIA DNE（Sage and White 1984, Burden 1987）や、オランダで開発された HIPRE 3+（Salo and Hämäläinen 1990）がある。HIPRE 3+は AHP をベースにしている。1960 年代に概念づけられたファジー集合を基礎としたファジー MCA もそのひとつであるが、多くは学術的論文や実験的な適用に限定されている。

3.2 多基準意思決定分析の手順

完全な多基準分析には通常、次のような 8 段階のステップがある。

- ①意思決定の文脈の確認 ②代替案の確認 ③目的と基準の確認 ④スコアリング
⑤ウェイトニング ⑥スコアの統合 ⑦結果の吟味 ⑧感度分析

ここで、①～④はインパクト（あるいはパフォーマンス）行列を構成するプロセスであり、多基準分析による意思決定支援のベースとなる。⑤～⑧については、ウェイトニングの考え方、あるいはスコアの統合を行うか否か等によって手順は異なり、様々な手法が提案されることになるプロセスである。

(1)『意思決定の文脈の確認』

最初の段階は常に、意思決定の文脈の理解を確認することから始まる。つまり、何のために多基準分析を実施しようとしているのかを明確にし、分析の参加者を選び、ステイクホルダーを確認したうえで、分析のやり方をデザインする。

分析を実施する目的はいくつか考えられる。複数の代替案から唯一最良のものがどれであるかを明らかにすること、総合的な順位付けをすること、各基準ごとの順位を知ることや、代替案の数を絞ることである。

分析の参加者は、プロジェクト等の実施主体、ステイクホルダーの代表、専門家、その他分析の助けになる情報をもつ人々などを含む。ステイクホルダー（stakeholder）とは、元々は「企業と社会」論のなかで株主（stockholder）との対比を意図

して用いられてきた用語であるが (谷口, 2001 参照), 現在では一般に利害関係者のことを指し, 対象となるプロジェクト等によって何らか (プラスまたはマイナス) の影響を受ける可能性のある人物という概念で用いられている。

意思決定支援のために多基準分析を行う場合, ステイクホルダーをどのように捉えて分析に組込むかが重要である。なぜならば, 多基準分析には誰の立場で評価するかによってスコアリングが大きく異なる基準が含まれるからである。例えば開発予定地周辺の環境保全に関する基準を考えてみよう。環境保護派と開発推進派では全く異なるスコアがはじき出されるであろう。また, 予定地の近隣住民と離れた所に住む住民とでも違うであろう。ステイクホルダーの範囲をどこまでとすればいいのか, さらに, ステイクホルダーによって受ける影響の違い, 濃淡をどのように捉えたらいいのか, そしてこのようなステイクホルダーの選好をどのように反映させればいいのか, 大きな問題である。したがって, 実施主体, 専門家等の各参加者の役割を含め, 分析のやり方を適切にデザインすることが求められる。

(2) 『代替案の確認』

考慮すべき一連の代替案を確認しリストにする。しかし, 最終的な確固としたものではなく, 分析の進行に伴って修正や追加がなされ, より良い代替案が設定される可能性があることを念頭におかなければならない。

(3) 『目的と基準の確認』

各代替案のインパクト (パフォーマンス) を評価するための基準を確認する。基準はブレインストーミング等によって引き出すことができる。その際に見落とされている視点がないかを確認するためには, ステイクホルダーを直接巻き込むこと, ステイクホルダーからの様々な情報を調査分析すること, 意思決定チームによってステイクホルダーの立場をロールプレイすること, 等の方法によって様々な視点を包括することが必要である。

そして, 目的のための価値ツリー (value tree) を構成することによって, 基準をグループ化し系統立てる。これは, 引き出された一連の基準がその問題に適切かどうかをチェックするプロセスであり, ウェイティングの際にも役立つ。また, 目的間のトレードオフの構造を全体的な観点から確認することを容易にする。

このような基準の選択にあたっては, 次の条件を確認する必要があることが指摘されている。

第 1 に, 「完全性 (Completeness)」。これは重要な基準を全て含んでいること, つまり, 重要な視点を見逃していないか, 代替案を比較するために必要な基準を全て含ん

でいるか、目的の重要な局面を基準として押さえているか、などである。

第2に、「重複性 (Redundancy)」。無駄に繰り返されている基準がないことである。これは後述する相互選好独立性や二重計算にも関係する。重複を防ぐためには、意思決定全体の文脈において、まずは完全性をめざして見逃しのないよう基準を並べる。その上で並べた基準をグループ化し整理していく過程で、重複の可能性を確認しながら取捨あるいは一本化していく方が確実であると考ええる。このような手順を踏むことによって、先に進んだ段階から再びフィードバックする場合にも、基準選択の確認が容易になる。

第3に、「操作性 (Operationality)」。各代替案をそれぞれの基準によって評価できることである。それぞれの基準は判断可能のように明確に定義されなければならない。必要な場合には、よりはっきりと定義できる副基準に分解することになる。

第4に、「相互選好独立性 (Mutual independence of preferences)」。基準は相互に選好が独立でなければならない。つまり、ある基準における評価が他の基準における評価に影響を受けないことが必要であり、相互独立ではない基準については一つに結合させることなどが必要となる。

第5に、「二重計算 (Double counting) がない」こと。二重計算は相互選好独立性と密接に関係する。

第6に、「サイズ (Size)」について。基準の数が多すぎないことが必要である。通常は6~20程度 (DTLR, 2001 参照), あるいは人間の評価プロセスの比較能力からして基準と副基準で各々8項目が限界である (パリチャート他, 2002 参照), という指摘がある。

第7に、「長期的影響 (Impact occurring over time)」について。費用便益分析など貨幣換算を基礎とした手法では割引率を用いる手法が確立されているが、多基準分析において時間選好問題はあまり積極的に扱われておらず、共通の手法はない。割引や、短期的・長期的といった時間区分で影響を扱うことになる。

(4) 『スコアリング (各基準に対する各代替案のインパクト (パフォーマンス) の確認』

スコアリングは以下のプロセスで行われる。まず、代替案による影響をそれぞれの基準ごとの尺度で明らかにする。貨幣尺度、定量的尺度だけでなく、定性的表現で記すこともある。この段階 (スコアリングをしない段階) でのインパクト (パフォーマンス) 行列そのものを意思決定者に提供することが分析の目的である場合がある。

次に、基準により代替案にスコアをつける。代替案のスコアを決める方法は3つあ

り、いずれも 0~100 のスケールに変換される。この際、方向感覚は共通していなければならない (スコアの高いものがより選好される)。

1 つ目のアプローチは、価値関数の考え方をを使うもので、影響の評価を 0~100 のスケールの価値スコアに変換する。ここで多くの場合価値関数は線形であると見なされるが、場合によっては非線形関数を用いることが望ましいこともある。

2 つ目のアプローチは、直接にランキングすることであり、一般的な測定尺度が存在しない場合や測定に取り組む時間的あるいは予算的余裕がない場合につかわれる。この場合も 0~100 の範囲の数が各代替案の価値に割り当てられる。

3 つ目のアプローチは、意思決定者から、各代替案のインパクト (パフォーマンス) を判断する表現の言葉を一対比較によって引き出す方法で、AHP がこれにあたる。一対比較は各基準に関して代替案のインパクト (パフォーマンス) を確認する手段として一般に受け入れられているが、内的一貫性に対する懸念、順位の逆転現象、言葉と得点とのリンクの根拠についてなど理論的には批判がある (Olson, 1996; DTLR, 2001 参照)。

そして最後に、『基準ごとのスコアの一貫性の確認』がある。

(5) ウェイティング

ウェイティングは各基準におけるスコアを統合する際に必要であるが、恣意性を孕んでいるために多基準分析の批判の要因となっている (Hanley, 2001 参照)。

多基準意思決定分析で用いられるウェイティングには様々な考え方があり、普遍的に受け入れられるウェイティングの方法はない。ここでは Pricing Out, Swing Weighting, 及び Rank order Centroid (ROC) weight を紹介する。

Pricing Out (Clemen, 1996 参照) は、属性の価値をある特定の属性 (通常は貨幣) の価値に換算する手法である。ある属性における便益の増分に対して支払うであろう最高額か、あるいは便益の減分を受け入れるであろう最低額として理解することは容易であるが、ほとんど市場の無い属性についての算定は困難であり、無理に行おうとすれば、複数の基準をそのままの尺度で評価し統合するという多基準分析の利点を捨てなければならない手法であるといえる。

Swing Weighting (Clemen, 1996; Goodwin 他, 1998; 林, 2000; DTLR, 2001 参照) は、意思決定者が仮想的代替案の個々の属性を相互に比較する一種の思考実験を必要とする。手順としては、まず各属性において最も選好されない罪悪のレベルにあるケースをベンチマークとして設定する。次に、属性のうち一つだけを最も選好される最良のレベルにできるならばどれを選ぶかを尋ね、選ばれた属性に 100 のウェイトを与

える。そして順次重要と考える属性を最悪から最良へと‘swing’させながらウェイトを引き出していくのである。

一般に、属性あるいは基準の重要性を直接的にウェイトづける方法や一対比較では、属性レベルのレンジに対してウェイトの反応が十分ではないというレンジ問題が存在する。これに対して、swing weights には属性がとる価値の幅（レンジ）に敏感であるという利点があることから、近年では多基準意思決定分析で一般的なウェイトイング手法となっている。

しかし、仮想的に代替案をイメージすることによって個々の属性を比較し、その重要性を何らかの数値（割合）で表現することは容易でない場合もある。次に紹介する ROCweight は ‘swings’ の比較によって順位をつけるにとどまっており、より簡易な手法である。

Rank order Centroid (ROC) weight は (Goodwin 他, 1998; DTLR, 2001 参照), エドワーズとバロンが開発したウェイトイング手法である。全ての基準を,

$$w_1 \geq w_2 \geq w_3 \geq \dots \geq w_n$$

のかたちに単純にランク付けすると、 n 個の基準がある場合、 i 番目の基準のウェイトは、次の式で与えられる。

$$w_i = (1/n) \sum_{j=i}^n (1/j)$$

エドワーズとバロンは広範囲にわたるシミュレーション研究の結果、75～87% の事例で swing weight を用いた場合 (SMARTS) と ROC weight を用いた場合 (SMARTER) で最も高い総便益がある代替案が一致するだろうとしている。

いずれのウェイトイング手法を選択するか、あるいはウェイトの割り当てについて意見の一致が得られない場合もある。その際には、2つ以上のウェイトの組合わせを並行して採用する。時にはウェイトに関する合意抜きで、代替案の選択に対して合意が可能なこともありうる。

(6) スコアの統合

このプロセスは採用する手法によって大きく異なる。ここで重要なことは結果の吟味で多くの場合感度分析によりなされる。

感度分析とは、分析の過程におけるさまざまなあいまいさや不一致が、最終的な結果に何らかの違いをもたらす範囲を調べるものである。

一般に、感度分析は分析結果の再確認のプロセスとして位置付けられているが、多基準意思決定分析においては、より積極的な役割が認められる。代替案を複数の基準で評価する場合、基準間のトレードオフが大きければ大きいほど、特にウェイトの選

択には議論があるであろうし、スコアリングについてもステイクホルダー間で認識が異なってくる。スコアリングやウェイトイングについて、あいまいさや不一致がある部分のインプットを変えてみることで、代替案の順位がどのようになり、その違いがどの程度であるかを確認することによって、合意形成への足がかりを得ることができる可能性がある。上位の代替案が限定されていて、それら代替案間の違いが小さいものであれば、合意形成にそれほどの困難はないであろう。一方、代替案の順位の逆転が大きい場合には、意思決定の文脈を再確認しながら新たな代替案の設定を含めたフィードバックが求められることになるかもしれない。

3.3 多基準分析手法の適用可能性

3.1で示した多基準分析手法を主として次の観点から比較検討する。すなわち、①さまざまな基準の独立性の仮定は重要か、②多様なデータを扱えるか、③透明性はあるか、④順位付け可能か、⑤制約がある場合に適用できるか、⑥リスクや不確実性を扱えるか、⑦ステイクホルダーの参加が可能か、という点である。

いずれの手法も質的・量的データの扱いが可能である。また、感度分析により、不確実性やリスクを扱うことが可能である。

1) 多目的最適化モデル

他の手法とは異なり、代替案の順序付けは考えていない。むしろ、最適化の解を求める過程で代替案が生みだされ、提案されることになる。多目的最適化モデルは制約を明確に扱う手法であるので、政策の実行に際して、さまざまな制約（限られた資源、閾値、など）がある場合にこの手法を適用することができる。いくつかの決定基準間のトレード・オフ（限界代替率）を先験的に特定化することが必要である。目的関数間のトレード・オフの決定はかなり困難ではあるが、意思決定者（ステイクホルダー）とのやりとりによってトレード・オフを把握することは可能である。

また、不確実性やリスクをファジー・データや確率要素で扱うことが可能である。

ステイクホルダーの参加は可能ではあるが、あまり明確には扱われない。しかし、グループ間や分析者とステイクホルダーの間での相互意思決定（interactive decision-making）の形も可能であり、相互の意見交換の仕方次第ともいえる。

2) 多属性効用関数

経済学の理論に基づいて構築されている。多属性効用関数の問題は、効用関数を導くために満たされなければならない強い仮定である。基本的に、費用便益分析における厚生理論と同じ公理を拠り所としている。よって、費用便益分析に向けられる批判

の多くが多属性効用関数にも向けられる。また、属性の独立性ははずせないものであり、相互依存性は許されないため、複雑に入り組んだ問題への対応は難しい。確率表現を用いることでリスクの扱いが可能。

厚生理論の仮定が成立し、効用関数を同定するためのデータが入手可能（確率と質的データ）な場合には、多属性効用関数の利用が可能である。多属性効用関数では効用関数の同定のためにステイクホルダーの参加が必須である。しかしながら、どのような、どの位の人数のステイクホルダーの参加を考えるかは大きな問題である（ただし、この点は、他の手法でのステイクホルダーの参加の場合にも同様である）。

3) 価値関数

多属性効用関数のように効用関数を導くために満たさなければならない強い仮定を必要としない点は有利である。反面、確率を扱えないため、選択が決定的な場合には適用できるが、選択やインパクトが確率要素を有する場合には使えない。

4) AHP

AHP は、基準間に相互依存関係がある場合にも適用可能である。複数の意思決定者（ステイクホルダー）の選好を考慮することが他の手法と比較して容易である。ウェイトの決定に関して、透明性あり。ステイクホルダーの参加が必須である。さまざまな対立関係にあるステイクホルダーがいる場合には、AHP が適している。感度分析によってリスクの扱いが可能である。ただし、上述したように理論的な面で問題もあることから、適用に際しては注意が必要である。

5) コンコーダンス分析

基準間の独立性が必要である。ステイクホルダーの参加は可能ではあるが、あまり明確には扱われない。しかし、グループ間や分析者とステイクホルダーの間での相互意思決定の形も可能となっている。閾値を用いてリスクの扱いが可能。

以上より、以下の結論を得る。

- ①厚生理論の仮定が成立し、効用関数を同定するためのデータが入手可能（確率と質的データ）な場合には、多属性効用関数の利用が可能である。
- ②確率要素を含まない決定論的扱いが可能な場合には、多属性効用関数より厚生理論上の制約のない価値関数の利用が可能である。
- ③対立関係にあるステイクホルダーの扱いが重要な場合には、提示した手法の中では AHP がより適している。
- ④閾値や制約が重要な場合には、コンコーダンス分析や多目的最適化モデルが適し

ている。

⑤問題が連続性を有し、離散的に表せない場合には多目的最適化が適している。

⑥代替案の完全な順序付けが必要な場合には、多属性効用関数、AHP が適している。

(萩原 清子 はぎはら きよこ)

〈参考文献〉

- Boardman, A., Greenberg, D., Vining, A. and Weimer, D., *Cost-Benefit Analysis – Concept and Practice*, Prentice Hall 2001
- Clemen, R. T., *Making Hard Decisions*, Duxbury Press 1996
- Dyer, J. S and Sarlin, R. K., “Measurable Multiattribute Value Functions,” *Operations Research*, Vol.27 –4, pp.810–822 1979
- Dupuit, J., De la mesure de l'utilité des travaux publics, *Annales des Ponts et Chaussées* 1844
- Edwards, W., “Social Utilities,” *The Engineering Economist Summer Symposium Series* 6, pp.119–129 1971
- Edwards, W., “How to Use Multiattribute Utility Measurement for Social Decision Making,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics SMC-7* : 5, pp.326–340 1977
- Fishburn, P. C., “Independence in Utility Theory with Whole Product Sets,” *Operational Research*, 13 (1), pp.28–45 1965
- 萩原清子編著『環境の評価と意思決定』東京都立大学出版会 2004
- 萩原良巳・萩原清子・高橋邦夫『都市環境と水辺計画』勁草書房 1998
- Hanley, N. and Spash, C. L., *Cost-Benefit Analysis and the Environment*, Edward Elgar 1993
- Hicks, J. R., “The Rehabilitation of Consumers' Surplus,” *Review of Economic Studies* 8 1940
- Hicks, J. R., “The Generalized Theory of Consumer's Surplus,” *Review of Economic Studies* 13 1945
- 市川伸一編『認知心理学4：思考』東京大学出版 1996
- Just, R. E., Hueth, D. L. and Schmitz, A., *Applied Welfare Economics and Public Policy*, Prentice-Hall. 1982
- Keeney, R. L., *Value-Focused Thinking : A Path to Creative Decisionmaking*, Harvard University Press 1992
- Keeney, R. L. and Raiffa, H., *Decisions with Multiple Objectives*, Cambridge University Press 1993, First published in 1976 by John Wiley & Sons
- 栗田啓子「解題」『デュピュイ 公共事業と経済学』日本経済評論社 2001 (近代経済学古典選集〔第2期〕)
- Krutilla, J., “Conservation Reconsidered,” *American Economic Review*, Vol. 57, pp.777–786 1967
- 合意形成研究会『カオス時代の合意学』創文社 1997
- Luce, R. D. and Raiffa, H., *Games and Decisions*, Wiley 1957
- Marshall, A., *Principles of Economics*, 8th ed., Macmillan 1920
- 内藤正明・西岡秀三『環境指標－その考え方と作成手法－』国立公害研究所 1984
- Nas, Tevfik, F., *Cost-Benefit Analysis : Theory and Application*, SAGE Publication Inc. 1996 (萩原清

- 子監訳『費用・便益分析』勁草書房 2007
- Nijkamp, P. (1977) *Theory and Application of Environmental Economics*, North-Holland 1977 (藤岡明房・萩原清子・金沢哲雄『環境経済学の理論と応用』勁草書房 1985)
- ネイカンブ、P., ヴァン・デルフト、P. リートヴェルト、金沢哲雄・藤岡明房訳『多基準分析と地域的意思決定』勁草書房 1989
- 岡田憲夫・キース・W・ハイブル・ニル・M・フレイザー・福島雅夫『コンフリクトの数理：メタゲーム理論とその拡張』現代数学社 1988
- Olson, D. L., *Decision Aids for Selection Problems*, Springer-Verlag 1996
- 佐伯胖『認知科学の方法』東京大学出版会 1986
- 佐伯胖『「きめ方」の論理 社会的決定理論への招待』東京大学出版会 1980
- Sen, A. K., *Collective Choice and Social Welfare*, Holden-Day 1970 (志田基与師監訳『集会的選択と社会的公正』勁草書房 2000)
- 繁橋算男『意思決定の認知統計学』朝倉書店 1995
- 田村坦之・中村豊・藤田眞一『効用分析の数理と応用』コロナ社 1997
- Vincke, P., *Multicriteria Decision-aid*, Wiley 1992
- Von Neuman, J. and Morgenstern O., *Theory of Games and Economic Behaviour*, second edition, Princeton University Press 1947
- Willig, R. D., "Consumer's Surplus Without Apology," *American Economic Review*, 66, No.4, pp.589-597 1976
- Yoon, K. P and Hwang, C-L., *Multiple Attribute Decision Making : An Introduction*, Sage Publications 1995